LE SÉCHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Le Centre de recherches pour le développement international, société publique créée en 1970 par une loi du Parlement canadien, a pour mission d'appuyer des recherches visant à adapter la science et la technologie aux besoins des pays en voie de développement ; il concentre son activité dans cinq secteurs : agriculture, alimentation et nutrition ; information ; santé ; sciences sociales ; et communications. Le CRDI est financé entièrement par le Parlement canadien, mais c'est un Conseil des gouverneurs international qui en détermine l'orientation et les politiques. Établi à Ottawa (Canada), il a des bureaux régionaux en Afrique, en Asie, en Amérique latine et au Proche-Orient.

© Centre de recherches pour le développement international 1983
Adresse postale : B.P. 8500, Ottawa (Canada) K1G 3H9
Siège : 60, rue Queen, Ottawa

Yaciuk, G.

CRDI, Ottawa CA
Alberta. Dept. of Agriculture CA

IDRC-195f

Le séchage des produits alimentaires : compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 6 au 9 juillet 1981. Ottawa, Ont., CRDI, 1983. 110 p. : ill.

/Séchage/, /aliments séchés/, /aliments déshydratés/, /valeur nutritive/ — /fruits séchés/, /conservation du poisson/, /céréales/, /café/, /légumes/, /commercialisation/, /demande de consommation/, /énergie solaire/, /déshydratation/, /aspects techniques/, /liste des participants/.

CDU: 664.8.047

ISBN: 0-88936-377-3

Édition microfiche sur demande

This publication is also available in English.

IDRC-195f

Le séchage des produits alimentaires

Compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 6 au 9 juillet 1981

Rédacteur : Gordon Yaciuk

Sous le patronage du
Centre de recherches pour le développement international,
Ottawa (Canada)

avec la collaboration du
Ministère de l'Agriculture de l'Alberta,
Edmonton (Canada)

Résumé/Abstract/Resumen

Les auteurs de ce volume sont des chercheurs et des techniciens venus de pays très différents les uns des autres du point de vue climat, géographie et conditions socio-économiques. Les disciplines représentées étaient aussi très diverses : économie domestique, alimentation, nutrition, physique, génie mécanique.

Le colloque a examiné les questions les plus importantes en ce qui concerne la conception et l'utilisation d'une installation de séchage : besoins en matière de séchage, l'accueil du consommateur, transmission de la chaleur et évacuation de l'humidité, sources de chaleur. Le chapitre sur les besoins en matière de séchage traite de la nécessité et de la durée de cette opération, de la préparation des échantillons, de l'action du séchage sur la qualité du produit, des problèmes de réhydratation et des problèmes de stockage du produit sec. Le chapitre sur l'accueil du consommateur traite des effets du séchage sur la valeur nutritive du produit, de la commercialisation d'un produit sec et de l'aide que peuvent apporter les consommateurs à l'amélioration d'un procédé ou d'un produit. Le chapitre sur la transmission de la chaleur et l'évacuation de l'humidité traite de la théorie et de la conception d'un séchoir, des modes de réglage et décrit une installation en service. Enfin, le chapitre sur les sources de chaleur donne des exemples de l'utilisation du soleil, des produits pétroliers, des déchets agricoles et du bois. Un exposé des conclusions dégagées par le colloque et de ses recommandations est présenté à la fin de l'ouvrage.

The authors of this volume include researchers and scientists from many countries that encompass diverse climatic, geographic, and socioeconomic conditions. Their disciplines were also numerous: home economics, food science, nutrition, physics, and engineering.

The workshop covered the most important areas in the design and operation of a drying system. These are: drying requirements, consumer acceptance, heat and mass transfer, and heat sources. Within drying requirements, the need for drying the product is discussed as well as drying times and rates, sample preparation, quality changes during drying, rehydration problems, and problems with storage of the dried product. The section on consumer acceptance includes the effects of drying on the nutritive value of food, the introduction of a dried food to the consumer market, and how consumers provide valuable information to scientists to help in improving a process or product. The theory and design of a drying chamber and process control are explained under heat and mass transfer and an operational, full-scale drying system is examined. Finally, under heat sources, a number of examples are given in the use of the sun, petroleum products, agriculture wastes, and wood as heat sources for a drying process. A final concluding commentary is made on the overall recommendations derived from the workshop and proposals for future work are given.

Los autores de este volumen comprenden investigadores y científicos de varios países que, en conjunto, abarcan diversas condiciones climáticas, geográficas y socio-económicas. Sus disciplinas respectivas también son numerosas: economía del hogar, ciencias de alimentación, nutrición, física e ingeniería.

El cursillo abarcó los aspectos más importantes en el diseño y operación de un sistema de deshidratación. Estos son: requisitos de la deshidratación, aceptación por el consumidor, trasferencia de calor y masa y fuentes de calor. Entre los requisitos se examina la necesidad de deshidratar el producto así como los tiempos e índices del proceso, preparación de muestras, cambios en calidad durante le deshidratación, problemas que presenta la rehidratación y problemas resultantes del almacenamiento del producto deshidratado. La sección de aceptatión por el consumidor comprende los efectos de la deshidratación sobre el valor nutritivo del alimento, la introducción de un alimento deshidratado en el mercado del consumidor, y como éstos a su vez proveen información valiosa a los científicos ayudándoles a mejorar un proceso o producto. Se explican la teoría y diseño de la cámara de deshidratación y el proceso de controlbajo trasferencia de calor y masa, examinándose un sistema operativo de deshidratación a escala comercial. Finalmente, y bajo el concepto de fuentes de calor, se citan varios ejemplos relacionados con el uso del sol, de productos petrolíferos, y desechos agrícolas, asi como el de la madera como fuentes de calor para procesos de deshidratación. Se efectua un comentario final sobre recomendaciones generales derivadas del cursillo al tiempo que se efectúan propuestas para el trabajo futuro.

Table des matières

Avant-propos 5

Participants 6

Introduction

Thème et objectifs du colloque **G. Yaciuk** 9

Besoins en matière de séchage

Le séchage du poisson en Inde **P.V. Prabhu et K.K. Balachandran** 11

Le séchage des légumes en Égypte **H.M. Ali et I.A. Sakr** 15

Le séchage des pommes de terre (*papa seca*) au Pérou **C. Lescano** 21

Le séchage du paddy en Indonésie **Suahyadi** 27

Accueil du consommateur

Les effets du séchage sur la valeur nutritive des produits alimentaires au Kenya **M.I. Gomez** 31

L'introduction du niébé dans l'alimentation du nord-est de la Thaïlande **T. Ngarmsak, M.D. Earle et A.M. Anderson** 36

Adoption de la banane déshydratée comme aliment de sevrage à Costa Rica **Celsa Lastreto G., Rodney Cooke et Armando Campos S.** 40

Commercialisation du poisson séché dans l'est de Java (Indonésie) **J.A. Sumardi, H. Purnomo, W.H. Susanto, Putiati, Darius et I. Suryo** 47

Transmission de la chaleur et extraction de l'humidité

Le séchage des grains de céréales aux Philippines **S.C. Andales** ... 53

Le séchage des oignons au Niger **A. Ba, Ch. Banzet et J.M. Degbe** 63

Le séchage du poisson aux Philippines **Ernesto V. Carpio** 65

Le séchage des raisins dans le nord du Chili **J.M. Olhagaray** 74

Sources de chaleur

L'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes en Sierra Leone **Michael W. Bassey** 77

Le séchage solaire et à l'air libre du paddy en Corée **Hak Kyun Koh et Chang Joo Chung** 86

Un séchoir à grains pour la ferme en Thaïlande **Sriwai Singhagajen** 94

Appréciation de la valeur économique de diverses sources d'énergie pour le séchage du café **R. Garcia, C. Porres, J.F. Calzada, J.F. Menchu et C. Rolz** 99

Séchoirs pour les coopératives de production alimentaire en Indonésie **Sjachputra** 105

Conclusions

Commentaires **G. Yaciuk** 109

Avant-propos

Aussi loin que l'on remonte dans l'histoire, les humains ont eu recours aux radiations solaires pour sécher les céréales, les légumes et les fruits, ainsi que le poisson et la viande dont ils se nourrissaient. Dans plusieurs pays, on utilise encore largement les rayons du soleil comme source directe d'énergie pour sécher et déshydrater les produits alimentaires. Le coût des combustibles fossiles s'avérant élevé, le séchage solaire direct ou indirect prendra de plus en plus d'importance dans le monde comme procédé de conservation des aliments.

Le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) subventionne plusieurs projets de recherche dans lesquels la radiation solaire intervient seule ou combinée avec la combustion de déchets agricoles comme moyen de sécher des plantes cultivées et d'autres produits alimentaires. Plusieurs de ces projets étudient l'influence des procédés de dessication sur la préservation des éléments nutritifs.

Comme les divers projets subventionnés par le CRDI touchant la déshydratation des produits et le séchage des céréales se situent dans des pays dont les conditions d'environnement sont fort différentes, et comme l'éventail des activités s'y rapportant couvre plusieurs disciplines scientifiques, il a été jugé opportun de convoquer des spécialistes de la recherche représentatifs de la diversité géographique et scientifique dont on doit tenir compte.

On a donc organisé, du 6 au 9 juillet 1981, à l'Université de l'Alberta et avec la collaboration du ministère de l'Agriculture (ADA) de cette province, un colloque comportant deux journées de réunions, une journée organisée par l'ADA consacrée à la visite d'une installation de séchage du grain, d'une ferme locale et d'un élévateur primaire, ainsi qu'une journée de visites privées de divers participants à des départements universitaires et à des organismes commerciaux. Les pays suivants étaient représentés au colloque : Bangladesh, Chili, Costa Rica, Corée, Égypte, Guatemala, Inde, Indonésie, Kenya, Malaisie, Mali, Niger, Pérou, Philippines, Sierra Leone, Singapour, Thaïlande et Zambie ; une immense diversité de conditions climatiques, géographiques et socio-économiques étaient donc représentées. L'expérience des participants s'étendait à l'économie domestique, les sciences de l'alimentation, la physique et l'ingénierie. Les principaux sujets dont il a été traité étaient surtout les besoins en matière de séchage, l'accueil du consommateur, la transmission de la chaleur et l'extraction de l'humidité et les sources de chaleur. Le présent ouvrage rassemble les communications qui ont été présentées et discutées ainsi que les commentaires du coordonnateur technique du colloque.

Mes collègues de la Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition (SAAN) estiment, que grâce à la qualité des exposés préparés par les participants, cette brochure sera utile aux personnes des pays en développement qui partagent les mêmes besoins et les mêmes intérêts.

J.H. Hulse, *Directeur*
Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition

Participants

A. Alam, Coordonnateur du projet d'études techniques post-récolte, Institut central de génie rural, Complexe Shri Guru Tegh Bahadur, T.T. Nagar, Bhopal 462 003 (Inde).

Hatem Mohamed Ali, Chef du laboratoire de nutrition des animaux et de la volaille, Centre national de recherches, Dokki, Le Caire (Égypte).

Silvestre C. Andales, Professeur adjoint et directeur de projet, Projet post-récolte UPLB/CRDI, Département des techniques de transformation des produits agricoles, Université des Philippines à Los Baños, College, Laguna 3720 (Philippines).

M. Zohadie Bardaie, Département de génie rural, Universiti Pertanian Malaysia, Serdang, Selangor (Malaisie).

Michael W. Bassey, Département du génie mécanique, Fourah Bay College, Université de Sierra Leone, Freetown (Sierra Leone).

Ernesto V. Carpio, Ingénieur de projet, Département des sciences et des techniques alimentaires, Université des Philippines à Los Baños, College, Laguna 3720 (Philippines).

Teoh Inn Chek, Lembaga Padi Dan Beras Negara, Tingkat 20-21, Bangunan UMBC, 4, Jalan Sulaiman, Kuala Lumpur, Peti Surat 108 (Malaisie).

Chong Thean Chhong, Section de chimie et de transformation alimentaire, Institut des normes et de la recherche industrielles de Singapour, Maxwell B.P. 2611, Singapour 9046 (République de Singapour).

J.M. Degbe, Office national de l'énergie solaire, B.P. 621, Niamey (Niger).

Dante B. de Padua, Chef d'équipe technique, Programme coopératif de recherches et de développement post-récolte dans le Sud-Est asiatique, a/s SEARCA, College, Laguna 3720 (Philippines).

W. Edwardson, Administrateur de programme principal, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454, Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

R.S. Forrest, Directeur associé, Secteur des techniques et projets ménagers, ministère de l'Agriculture de l'Alberta, Agriculture Building, 9718 107 Street, Edmonton, Alberta (Canada).

Ricardo García, Ingénieur, Division de la recherche appliquée, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, Avenida La Reforma 4-47 Zone 10, Apartado Postal 1552 (Guatemala) C.A.

Celsa Lastreto Gomez, Centro de Investigaciones on Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica, San Jose (Costa Rica).

M.I. Gomez, Maître de conférence, Département des sciences et des techniques de l'alimentation, Faculté d'agriculture, Université de Nairobi, B.P. 29053, Kabete, Nairobi (Kenya).

H.K. Koh, Professeur associé, Division du machinisme agricole et des techniques de transformation, Département du génie rural, Collège d'agriculture, Université nationale de Séoul, Suweon (Corée) 170.

Carlos Lescano, Jefe, Departamento de Tecnología de Alimentos y Productos Agropecuarios, Universidad Nacional Agraria La Molina, Apartado 456, Lima (Pérou).

J. Lorenzana, Département du génie rural, Isabela State University, Echaque, Isabela (Philippines).

Joseph M. Mwale, Agent scientifique principal, Section de la recherche en techniques alimentaires, Conseil national de la recherche scientifique, B.P. CH-158, Chelston, Lusaka (Zambie).

Candido Joven Miguel, Pasig Distributors Corporation, 114 Plaza Rizal, Pasig, Metro Manila (Philippines).

Tipvanna Ngarmsak, Département des produits agricoles, Faculté d'agriculture, Université de Khon Kaen (Thaïlande).

J.M. Olhagaray, Institut de recherche technologique (INTEC/CHILE), Casilla 667, Santiago (Chili).

P.V. Prabhu, Scientifique, Institut central des techniques de la pêche, Projet de transformation du poisson CIFT/CRDI, Willingdon Island, Matsyapuri P.O., Cochin 682 029 (Inde).

Abdus Satter, Agent scientifique principal, Génie rural, Institut de recherche agricole du Bangladesh, Joydebpur, Dacca (Bangladesh).

O.G.A. Schmidt, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

Sriwai Singhagajen, Chef, Section du traitement et du stockage, Division du génie rural, Département de l'agriculture, ministère de l'Agriculture et des coopératives, Bangkhen, Bangkok 9 (Thaïlande).

Wenceslao M. Sison, Superviseur des plans et programmes agricoles et directeur de projet, Direction générale de la recherche et des services techniques, Service national de l'alimentation, 101 E. Rodriguez Sr. Avenue, Matimyas Building, Quezon City (Philippines).

Sjachputra, a/s Haji Muslimin Nasution, Ministry of Co-operatives, Departemen Perdagangan Dan Koperasi, Sekretariat Menteri Muda Urusan Koperasi, B.P. 384, Jakarta (Indonésie).

Suahyadi, Directeur de projet, Bureau national de logistique (BULOG), Projet BULOG/CRDI sur la technologie post-récolte du riz, B.P. 2345, Jakarta (Indonésie).

J.A. Sumardi, Departemen Pendidikan Dan Kebudayaan, Universitas Brawijaya, Proyek Kerjasama Unibraw/IDRC, Jalan Mayjen Haryono 169, Malang, Jatim (Indonésie).

Salomon Chavez Tapia, Departamento de Tecnología Pesquera, Universidad Nacional Agraria La Molina, Apartado 456, Lima (Pérou).

Cheick Oumar Traoré, Laboratoire de l'énergie solaire, B.P. 134, Bamako (Mali).

S. Vogel, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

G. Yaciuk, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

Personnel du CRDI

M.C. Beaussart, Administrateur adjoint, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, CRDI, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

A. Chouinard, Rédactrice technique, Division des communications, CRDI, B.P. 8500, Ottawa, Ontario (Canada) K1G 3H9.

K. Kealey-Vallière, Rédactrice technique adjointe, Division des communications, CRDI, B.P. 8500, Ottawa, Ontario (Canada) K1G 3H9.

Thème et objectifs du colloque

G. Yaciuk[1]

L'expérience passée nous a persuadés que ce colloque devrait traiter des quatre sujets les plus importants dans la conception et l'utilisation des installations de séchage, c'est-à-dire, les besoins en matière de séchage, l'accueil du consommateur, la transmission de la chaleur et l'extraction de l'humidité, et les sources de chaleur. Les communications, en majorité, portent sur la spécialité de chacun de leurs auteurs et ne paraissent pas suivre un modèle particulier. Tous, cependant, répondent à un genre d'information que l'on peut considérer comme pertinent à l'un des quatre sujets ci-dessus.

La première section traite des besoins en matière de séchage de quatre produits différents. Du point de vue de la transmission de la chaleur, on peut, en termes généraux, considérer le poisson comme une dalle, le riz comme un lit poreux et les pommes de terre comme des cubes ou des cossettes. Chaque exposé examine les besoins du produit en matière de séchage, la durée et l'intensité de ce séchage, la préparation d'échantillons, les modifications de la qualité pendant l'opération, les problèmes de réhydratation et ceux du produit séché en cours d'entreposage.

La section II présente quatre exposés concernant l'accueil fait aux produits par le consommateur. Le premier traite des effets du séchage sur la valeur nutritive, en particulier sur la préservation de la carotène et de la vitamine C, pour divers légumes du Kenya. Bien que la deuxième communication porte sur la préparation de nouveaux aliments à base de niébé, en Thaïlande, certaines suggestions peuvent être appliquées à l'introduction d'un aliment séché. Le troisième exposé examine comment les consommateurs peuvent collaborer avec un scientifique pour améliorer certains procédés ou produits. On constate fréquemment qu'un procédé amélioré procure un rendement supérieur à l'usage que pourrait en obtenir le producteur-transformateur (en général le cultivateur ou le pêcheur). Le quatrième exposé traite de la commercialisation du poisson à Java.

Il est impossible de concevoir une installation de séchage efficace sans tenir compte, jusqu'à un certain point, du régime de transmission de la chaleur et d'extraction de l'humidité. Les trois premiers exposés de la section III discutent de la théorie et de la conception d'une installation de séchage et du contrôle du procédé. Le quatrième étudie le séchage commercial du raisin à grande échelle et, à ce titre, est le seul rapport à ce colloque qui présente un système de ce genre en service.

La section IV rapporte divers exemples d'utilisation des radiations solaires, de produits pétroliers, de déchets agricoles et de bois comme sources calorifiques dans les opérations de séchage.

Je remercie spécialement Amy Chouinard et Kathy Kealey-Vallière de la Division des communications du CRDI pour leur précieux concours comme rédactrices, ainsi que R.S. Forrest, W. Edwardson et S.M. Vogel qui ont présidé les séances, M.C. Beaussart qui s'est chargé de la logistique et, enfin, le CRDI et le ministère de l'Agriculture de l'Alberta qui ont financé la tenue de ce colloque.

1. Coordonnateur technique du colloque, Administrateur de programme à la Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

Le séchage du poisson en Inde

P.V. Prabhu et K.K. Balachandran[1]

Résumé De tous les procédés dont on se sert pour conserver le poisson de façon durable, le séchage est sans doute le plus simple. Il n'exige ni matériel compliqué ni main-d'œuvre experte. Le séchage traditionnel au soleil, le plus couramment utilisé, cause cependant des problèmes, par sa lenteur notamment, et les risques de contamination par le sable, les insectes et les microbes pathogènes. Il vaut donc la peine d'étudier les avantages du séchage mécanique du poisson. On trouvera dans l'exposé qui suit des détails sur l'influence de la température et de l'humidité relative dans le séchoir, ainsi que sur la vitesse de l'air et le rôle du salage préalable du poisson. On y mentionne également certains inconvénients généralement observés pendant l'entreposage et divers moyens de les minimiser.

Le poisson est exposé à se gâter rapidement sous l'action des bactéries, des enzymes et des réactions chimiques. On peut cependant minimiser ou arrêter l'action des bactéries et des enzymes en contrôlant la température d'entreposage. La réfrigération, la congélation et la mise en boîtes sont au nombre des meilleurs procédés. Toutefois, ces techniques nécessitent un équipement compliqué pour la préparation, l'emmagasinage et la distribution du produit transformé.

Le développement des bactéries et l'action des enzymes exigent la présence d'humidité. Chez le poisson, l'extraction de l'eau réduira donc les effets nocifs. Le séchage, seul ou en combinaison avec la salaison ou la fumaison, est un moyen traditionnel largement utilisé pour conserver le poisson. Salage, fumage et séchage sont des procédés n'exigeant que le minimum d'équipement et qui peuvent être effectués par des personnes sans compétence particulière. Normalement on combine le séchage avec le salage ou le fumage, ou les deux ensemble. Le salage ralentit ou, même, empêche la pourriture bactérienne du poisson, comme peuvent le faire également certains agents chimiques présents dans la fumée. La dessication peut enrayer le développement des bactéries et des moisissures. En somme, il s'agit d'un procédé fort simple qui n'exige ni outillage compliqué ni main-d'œuvre qualifiée et qui donne un aliment de bonne conservation et hautement concentré.

Une fois reconnue la nécessité de déshydrater le poisson pour empêcher l'action des micro-organismes et des enzymes, on se préoccupera de la quantité d'eau qu'on peut extraire sans nuire à la qualité et à la saveur du produit. La plupart des bactéries nuisibles ne se développent pas dans les aliments dont la teneur en humidité (TH) est inférieure à 25 %. La formation des moisissures est également empêchée quand cette teneur ne dépasse pas 15 %. Lorsqu'on sale le poisson avant de le sécher, la proportion d'eau acceptable peut cependant être plus élevée. Selon la quantité de sel utilisée, on estime tolérable un taux de TH de 35 à 40 % pour enrayer l'action des bactéries et des moisissures.

La présente communication ne traitera que du séchage du poisson frais ou salé à l'aide du soleil ou de procédés mécaniques. En Inde, on pratique beaucoup le séchage solaire et on l'applique surtout aux prises secondaires provenant de la pêche des crevettes. Le poisson est séché frais ou salé, selon les espèces. La pratique la plus courante consiste à l'étaler sur une plage de sable, des nattes de bambou ou des plates-formes en ciment surélevées, où on le laisse pendant 2 ou 3 jours. Les espèces comme les anchois (*Engraulis indica*) sont séchées sans sel. Les plus grosses espèces, par contre, sont généralement salées entières ou après avoir été ouvertes. Même pour les plus gros poissons, comme le requin, on pratique de profondes incisions dans la chair ouverte pour y faire

1. Central Institute of Fisheries Technology (CIFT), Willingdon Island, Matsyapuri P.O., Cochin 682029, India.

pénétrer le sel, et l'on attend jusqu'au lendemain pour les sécher ensuite. Les espèces comme le poisson dit « canard de Bombay » (*Harpodon nehereus*) qui, séché et assaisonné de cari est un délice pour les gourmets et qui, à l'état frais contient de 90 à 92 % d'eau, sont suspendues à des échafaudages en plein air et séchées. Le plus souvent, après une journée de séchage, les poissons sont mis en tas jusqu'au lendemain et étalés ensuite pour finir de sécher. Ce procédé facilite la diffusion aux parties périphériques de l'eau présente dans les parties profondes. L'évaporation s'accomplit alors plus aisément.

Séchage du poisson non salé

Les poissons qu'on met généralement à sécher sans salage comprennent notamment les anchois, les petits poissons appelés populairement « ventres argentés » et « canard de Bombay » (*Harpodon nehereus*), qui sont destinés à la consommation humaine, ainsi que d'autres variétés de petite taille qui seront transformées en farine. Les moyens dont on dispose aux points de débarquement déterminent le mode de séchage qui sera adopté, soit qu'on les étende sur le sable de la plage, sur des nattes ou, moins fréquemment, sur des plates-formes en ciment servant à cet usage. Le « canard de Bombay », comme on l'a mentionné plus haut, est souvent suspendu à des échafaudages.

Cette dernière espèce est typique sur les côtes du Gujarat, en Inde, où l'on pêche d'énormes quantités de poisson (environ 80 000 tonnes) dans une période de quatre mois. Seule une très faible proportion de ces prises est consommée à l'état frais, tout le reste étant séché au soleil et utilisé pour la consommation locale ou exporté. Le procédé actuellement en usage consiste à laver le poisson à l'eau douce et à le suspendre par paires attachées bouche à bouche à des cordes superposées, tendues horizontalement et laissant entre elles un espace d'environ 30 cm. D'habitude, on suspend ainsi de 80 à 100 poissons par mètre. Une étude systématique de divers aspects du séchage de l'*Harpodon nehereus* sur échafaudages indique que la dessication est la plus active avec 50 à 60 poissons supendus par mètre de corde. L'air peut ainsi circuler librement dans les rangées et le produit obtenu acquiert des qualités physiques et organoleptiques satisfaisantes. Ce procédé permet d'extraire 87 % de la teneur en eau du poisson frais. La réduction du nombre des poissons par mètre de corde n'a pas raccourci la durée du séchage, tandis qu'en augmentant la quantité de poissons, le séchage a été ralenti et accompagné d'un déchet plus considérable.

Normalement, lorsque le poisson est séché sans salage, l'opération se poursuit jusqu'à ce que la TH descende à 10 % environ. Bien que le « canard de Bombay » et les anchois séchés de cette manière soient destinés à l'exportation, d'autres poissons sont consommés sur place ou transformés en farine.

Poisson salé, séché au soleil

En Inde, diverses espèces de poissons, grands et petits, à chair grasse ou maigre sont d'abord salés, puis séchés au soleil. Maquereaux, tetardes, soles, lactaires, loups et requins, entre autres, sont le plus généralement conservés de cette manière. Normalement, on les ouvre sur la face dorsale, on leur ajoute du sel marin ordinaire dans une proportion de 5 à 1 et on les laisse ainsi jusqu'au lendemain. On les met ensuite à sécher au soleil durant 2 ou 3 jours, jusqu'à ce que la TH baisse à 35 % environ. Les poissons séchés après salage sont généralement vendus dans le pays.

De façon générale, les poissons destinés au séchage ne sont pas de la première fraîcheur. Souvent il s'agit seulement de ceux qu'on n'a pu vendre au marché à l'état frais. La glace est rarement utilisée ou ne l'est qu'avec parcimonie. Le poisson n'est pas manipulé avec le soin voulu et, sauf pour de rares exceptions, le séchage s'effectue à l'extérieur avec tous les risques de contamination qui s'ensuivent. Les mouches y déposent souvent des œufs qui, même si l'on ne s'en aperçoit pas immédiatement, causent des ennuis pendant l'entreposage. Parfois, le poisson avarié constitue un risque pour la santé publique.

Séchage mécanique du poisson

À cause des inconvénients afférents au séchage naturel au soleil, on s'intéresse maintenant à la dessication du poisson par des procédés mécaniques. Dans ce cas, le séchage peut s'effectuer sous un contrôle de la température, de la vitesse de l'air, de l'humidité relative (HR) de l'atmosphère du séchage, contrôle qui doit être assez rigoureux pour assurer au produit obtenu une qualité satisfaisante.

Température du séchage

Dans les séchoirs mécaniques, c'est l'air qui sert de véhicule à la chaleur transmise au poisson,

ainsi qu'à la vapeur d'eau provenant de l'opération. Au premier stade, la chair du poisson étant saturée d'eau, la température du séchage ne doit pas dépasser 40 à 50 °C, suivant le genre de poisson utilisé. A des températures supérieures, une bonne partie de la chair subit un début de cuisson qui rend le produit final cassant.

Vitesse de l'air

Dans les séchoirs mécaniques à air chaud, on a observé que plus élevée est la vitesse de l'air à la surface du poisson, plus élevé sera le taux d'évaporation de l'humidité. Cependant, au-delà d'une certaine limite, cette vitesse peut provoquer de petits tourbillons entre les poissons et produire un séchage irrégulier. Des expériences ont révélé qu'une vitesse de 1,5 à 2 m/sec. est l'idéal dans la plupart des cas.

Humidité relative

Le taux d'évaporation de l'humidité dépend partiellement de la pression de la vapeur d'eau dans l'air entourant le poisson, et partiellement de la pression de la vapeur d'eau à sa surface. En conséquence, à une vitesse constante de l'air, plus celui-ci sera sec, plus rapide se fera l'évaporation de l'eau.

L'eau que renferme le poisson n'est pas pure, mais contient des sels dissous, des protéines, etc. Lorsqu'elle suinte à la surface du poisson, ces résidus restent et, si l'air est très sec, ils forment une croûte. Ce phénomène constitue ce qu'on appelle la cémentation. Celle-ci survient également lorsque la température de l'air s'élève ; alors, le flux de l'eau des parties profondes vers la surface devient plus difficile, la température de la chair s'élève et sa qualité en sera affectée conséquemment. Également, si l'humidité relative de l'air au point d'entrée du séchoir est trop élevée, le séchage sera prolongé et le poisson se gâtera avant la fin de l'opération. L'humidité relative recommandée dans les séchoirs à air chaud est de 50 à 60 %.

Périodes de régimes constant et décroissant

On distingue deux stades dans le séchage à l'air du poisson : la période du régime constant et la période du régime décroissant. Durant le premier stade, le taux d'évaporation de l'eau par unité de surface et de durée demeure constant et l'effet est similaire à l'évaporation provenant d'une surface saturée. Une fois l'eau superficielle évaporée, l'opération ne peut se poursuivre qu'au rythme de la diffusion qui se produit des parties profondes à la périphérie du poisson et qui va en diminuant à mesure que le séchage progresse. En conséquence, le taux d'évaporation diminue également. C'est le régime décroissant.

Même avec la dessication mécanique, il faut de 18 à 22 heures pour abaisser l'humidité du produit final au degré qui en assurera le bon entreposage. Bien que le procédé mécanique prenne moins de temps que le séchage solaire, on le considère encore comme trop long. Évidemment, aussi, la production du poisson séché mécaniquement se révèle onéreuse, comparativement à la méthode naturelle. Le poisson séché est une denrée peu coûteuse pour le peuple, et toute augmentation sérieuse de son prix par suite de la généralisation du procédé risquerait d'être inacceptable pour les consommateurs, même si ces derniers apprécient la meilleure qualité du produit. On devra donc trouver des moyens d'abréger la durée du séchage sans préjudice pour la qualité, afin de réduire les coûts de production. Une méthode suggérée à cette fin serait de soumettre le poisson à des températures successivement plus élevées durant la période du régime décroissant. Cette méthode est déjà utilisée avec un grand succès pour le séchage de certains poissons tropicaux.

À l'Institut central des techniques de la pêche (ICTP), en Inde, le poisson aussitôt ouvert (poids moyen 90 à 110 g) est mis à sécher à un régime de température s'élevant graduellement, en commençant à 45 °C, jusqu'à la fin de la période de séchage constant ; après quoi on augmente progressivement la température jusqu'à 60 °C, avec une HR de 50 %. Le poisson ainsi séché atteint finalement une teneur en humidité inférieure à 20 % après 12 à 14 heures.

Dans le cas du poisson salé, on ne constate pas de période à régime constant. Le taux de séchage initial élevé tombe brusquement, mais on peut dans une large mesure compenser cette baisse rapide en élevant lentement la température. Dans le cas du maquereau et de la tetarde, il a fallu 10 à 12 heures pour réduire la teneur en humidité à moins de 30 %.

Un séchoir à tunnel fonctionnant d'après ce principe et avec des réglages appropriés de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air a été mis au point à l'ICTP.

Réhydratation

En Inde, on consomme le poisson séché de différentes manières, soit en friture dans l'huile, comme chutney, soit préparé comme le poisson

frais après trempage dans l'eau. Une certaine dénaturation des protéines a lieu au cours de la dessication, en particulier lorsque le séchage est effectué à une température élevée, comme dans les séchoirs mécaniques, affectant ainsi le pouvoir de réhydratation. Toutefois, en contrôlant avec soin les conditions du séchage, il est possible d'éviter la cémentation ainsi qu'une élévation trop rapide de la température de la chair, et d'obtenir un produit dont la texture sera très satisfaisante après réhydratation.

Emballage et entreposage

Les principales causes d'avarie du poisson séché sont les moisissures, les bactéries, la décoloration, le rancissement, les attaques d'insectes et les transformations de la texture. La formation de moisissures est relativement faible à moins de 65 % de HR mais elle est rapide à 75 % de HR ou plus, situation qui est assez fréquente dans les régions côtières. Toutefois, à la saison de la mousson, l'humidité peut atteindre ou dépasser 90 % et l'état de l'atmosphère devient alors particulièrement propice à tous les genres de pourrissement. L'anoli de mer (sp. *Saurida*) salé et séché, conservé à l'extérieur a subi les modifications suivantes de sa teneur en humidité au cours de ses 4 mois d'entreposage. TH initiale : 28 % ; après entreposage à 55–60 % de HR pendant 3 mois, 19 % de TH ; et après un mois d'entreposage à 90 % de HR, 45 % de TH.

À 90 % de HR sous l'action des bactéries et des moisissures, la chair du poisson devient gluante, flasque et fortement décolorée. Bien que la pourriture bactérienne puisse être limitée dans le poisson salé, les avaries dues aux moisissures se manifestent aussi bien dans le poisson salé que dans le non salé. Les traitements à l'acide sorbique et au propionate de sodium réussissent à enrayer l'action des moisissures, mais le problème demeure quand il s'agit d'éviter les pertes ou l'absorption d'humidité. Dans le premier cas, les difficultés proviennent surtout d'une perte de poids et d'un durcissement de la texture, et dans le deuxième de pourritures fortuites et d'attaques par les bactéries et les moisissures.

Un autre indice important d'avarie dans le poisson salé est l'apparition d'une coloration rosée imputable au développement des bactéries halophytes de l'espèce *Serratia*. Le sel utilisé est à l'origine de ces micro-organismes. On sait que le sel solaire (sel marin) en contient d'assez grandes quantités, d'où l'incidence plus fréquente du problème lorsqu'on sale le poisson avec ce genre de sel.

Le poisson séché en général, et les poissons gras en particulier, se décolorent durant l'entreposage. Ils acquièrent également une odeur et une saveur rances. Le coût supplémentaire d'emballages étanches à l'air ne serait pas économiquement acceptable et l'on n'en a donc pas fait l'essai.

Bien que l'on fasse état de temps à autre de l'efficacité de divers agents antioxydants, tels que l'hydroxyanisol-butyle (BHA), l'hydroxytoluène-butyle (BHT), etc., comme préventifs du rancissement du poisson, on ne dispose d'aucune information sur leur usage commercial.

L'infestation par les insectes ne présente pas d'inconvénients sérieux pour l'entreposage du poisson salé, mais elle est courante pour le poisson non salé. Un moyen de la prévenir est la fumigation.

Le poisson séché commercialement, en particulier sur la côte orientale de l'Inde, est empaqueté dans des nattes de feuilles de borasse (palmier) solidement ficelées et recouvertes de toile d'emballage cousue aux joints. À l'heure actuelle on ne prépare pas de poisson séché, empaqueté pour le consommateur ; cependant, celui qui est séché mécaniquement est empaqueté en sacs de polyéthylène pour le marché détaillant. Ce genre d'empaquetage n'est cependant pas assez solide pour résister aux nageoires et autres aspérités du poisson séché. On étudie actuellement l'utilisation de pellicules en polyéthylène ou en chlorure de polyvinyle de faible et de haute densité pour l'empaquetage du poisson séché vendu au détail.

Le séchage des légumes en Égypte

H.M. Ali et I.A. Sakr[1]

Résumé Un séchoir solaire a été utilisé pour le séchage de la guimauve potagère (*Corchorus olitorius* L.) et du gombo (*Hibiscus esculentus* L.). Le procédé repose sur l'emploi d'air chauffé à 60 °C en moyenne. Les résultats indiquent que le taux de dessication a été élevé durant les trois premières heures et s'est ensuite ralenti jusqu'à la fin de l'opération. Cette dernière, pour la guimauve potagère et pour le gombo, a duré respectivement 22,5 heures et 40 heures en moyenne. La proportion d'humidité évaporée pendant cette période a été d'environ 72 à 75 %. La qualité du produit séché a été jugée satisfaisante par le consommateur ainsi que sa valeur nutritive. L'entreposage durant 32 semaines à la température ambiante n'a pas affecté la qualité ni modifié la composition chimique du produit.

Vu le potentiel commercial de ces deux végétaux à l'état sec, on a effectué l'étude technique de l'utilisation économique éventuelle d'une telle installation de séchage dans les régions rurales.

Dans plusieurs pays, la culture commerciale des fruits et des légumes est limitée à certaines saisons et à certains endroits. Aussi, afin de satisfaire la demande pendant l'année entière et à l'échelle du pays, on doit recourir à divers procédés de conservation. Les causes de pertes sont aussi multiples que complexes et se rattachent à des croyances et à des habitudes qui régissent les systèmes traditionnels de traitement des récoltes et compliquent l'adoption de changements. L'on doit donc étudier avec soin ces facteurs et bien les comprendre avant d'introduire avec des chances de succès de nouvelles techniques et pratiques de conservation.

Les techniques de séchage, comme procédé de conservation des aliments, semblent offrir une solution satisfaisante dans la plupart des situations propres aux économies en développement. C'est pourquoi le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) conjointement avec le Centre national de recherches (CNR) d'Égypte a subventionné un projet de mise au point d'un séchoir solaire communal pouvant effectuer le séchage des produits sans en affecter la valeur nutritive.

1. Laboratoire de nutrition des animaux et de la volaille, Centre national de recherches, Dokki, Le Caire (Égypte).

Méthodologie

On a d'abord recueilli les informations essentielles concernant les conditions climatiques dominantes, telles que : intensités des radiations solaires, vitesses du vent, pluviosité, température de l'air ambiant et humidité relative (HR). (L'étude des données météorologiques devrait se poursuivre durant une dizaine d'années au moins pour obtenir une bonne moyenne.) Des renseignements ont été recueillis sur l'époque de la récolte, le rendement total, les quantités transformées et la composition des produits frais. On a suivi avec attention les opérations de séchage en cours, à l'échelon officiel et dans les organisations rurales, ainsi que l'évaluation de la composition chimique des produits. Des échantillons des légumes ont été mis à sécher artificiellement dans un four chauffé à l'électricité et par les rayons solaires afin d'en relever la valeur nutritive et d'obtenir une appréciation économique de toute l'opération. Le séchoir solaire a été conçu en fonction des conditions climatiques, de l'énergie solaire quotidienne utilisable, du type de culture et de l'importance de l'opération.

Un questionnaire a été préparé pour déterminer quels produits devraient être séchés, comment ceux-ci seraient acceptés, de quels marchés ils disposeraient, quelles étaient les préférences des consommateurs, les quantités totales récoltées quotidiennement et la proportion qui

serait conservée et, enfin, les possibilités d'entreposage.

Pour les procédés expérimentaux de séchage, on a utilisé une certaine quantité de produits à l'état vert fraîchement récoltés et livrés dans des sacs en plastique. On les a étendus sur des claies qui ont été placées dans la salle de séchage sur trois rangées superposées. L'air chaud était pulsé dans le séchoir par un ventilateur. Des thermocouples placés à des endroits stratégiques et raccordés à un potentiomètre enregistreur à 17 points relevaient les températures horaires de l'air ambiant et de l'air chaud. L'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie était enregistrée sur un hygrothermographe. Le débit d'air était calculé comme étant le produit de la vitesse de l'air multipliée par la surface de la section transversale. Pour la mesure de la teneur en humidité (TH), de la cendre, de l'extrait non azoté, de la protéine et des hydrates de carbone totaux des produits à l'état frais et sec, on a suivi les méthodes de l'Association of Official Agriculture Chemists (Association des chimistes agricoles officiels) (ACAO, 1968).

Les produits séchés ont été entreposés à la température du local, dans des sacs de plastique ou de jute hermétiques, liés avec des cordes. Un échantillonnage bimensuel permettait de vérifier le moisissement et d'établir la valeur nutritive des légumes. Une évaluation techno-économique du séchoir commercial a également été effectuée en tenant compte de la différence de coût entre les produits frais et ceux transformés.

Plantes pouvant être séchées

Les résultats obtenus indiquent la possibilité de conserver par séchage deux récoltes principales de légumes dans les localités rurales, soit la guimauve potagère (*Corchorus olitorius* L.) et le gombo (*Hibiscus esculentus* L.). Toutes deux trouveraient sans doute des débouchés urbains.

Le gombo et la guimauve potagère se plantent en février et mars. Une première récolte a lieu en juin, et elle est suivie d'autres jusqu'en septembre et octobre. Les premiers produits sont consommés frais et les suivants mis à sécher. La guimauve peut donner 6 récoltes et le gombo environ 4 ou 5. Chaque récolte peut rendre en moyenne 1,5 t (la production annuelle totale de guimauve potagère s'élève à 73 000 t, et celle du gombo à 65 000 t). L'intervalle moyen entre chaque récolte est de 20 à 25 jours.

Les légumes fraîchement récoltés sont mis dans des sacs de jute, arrosés d'eau et livrés aux marchés par camion. La guimauve potagère commence à se détériorer une douzaine d'heures après la récolte, tandis que le gombo se conserve frais pendant 2 à 4 jours. Le taux de détérioration diffère considérablement d'une récolte à l'autre. Les dommages peuvent également résulter de conditions de manutention et d'entreposage inadéquates avant l'arrivée au marché, surtout si ce dernier est éloigné de la ferme. Vu le peu de terre cultivée par le fermier égyptien et le mécanisme des marchés, les cultivateurs sont contraints soit d'accepter les prix qu'on leur offre, soit de vendre leurs produits de première qualité au marché de la ville et de déshydrater le reste pour l'écouler hors saison. Dans ce dernier cas, ils courent le risque de voir le produit, s'il a été imparfaitement déshydraté, s'infecter facilement de moisissures.

Les légumes séchés, par rapport aux produits frais, représentent environ 4,5 % de la production totale ; cette dernière, cependant, se développe rapidement et il est donc difficile d'obtenir des chiffres précis concernant son taux d'accroissement annuel.

Revue des opérations de séchage existantes

Les principales régions administratives productrices de légumes sont situées dans le delta du Nil. Quarante-deux villages choisis comme échantillonnage et représentant 1 % du total pour l'Égypte ont été visités pour y étudier les procédés traditionnels de séchage en usage dans les collectivités rurales.

Dans toutes les régions visitées, le séchage au soleil était la règle. Nulle part on ne pratiquait de dessication artificielle. Lorsque le prix de vente des produits baisse trop sensiblement, les cultivateurs entreprennent le séchage de leur récolte : ils lavent d'abord les légumes pour les débarrasser de la saleté superficielle et les étendent ensuite sur des nattes ou toute autre surface appropriée pour sécher au soleil. A l'échelon du village, toute la famille est occupée à ce travail.

Dans les régions administratives proches des grandes villes comme Le Caire et Alexandrie, on utilise une méthode de séchage qui permet d'alimenter ces marchés urbains. Une série de nattes est étendue sur le sol, couvrant une surface variant de 200 à 2000 m^2. Les enfants commencent la récolte de bonne heure au matin et laissent les légumes sur le sol pendant une couple d'heures pour s'y flétrir légèrement. On les ramasse ensuite et on les amène jusqu'à l'aire de séchage où ils sont lavés et étendus sur les nattes pour sécher partiellement au soleil. Demi-séchés, les légumes

sont transférés à une deuxième aire de séchage, à l'ombre cette fois, dans le but de préserver autant que possible la couleur verte naturelle que les acheteurs recherchent de préférence.

Pour la plus grande partie, les produits sont ensachés dans des sacs de jute de 50 kg et envoyés ainsi aux marchés de la ville. La durée moyenne du séchage au soleil pour la guimauve potagère et le gombo est, respectivement, de 3 à 4 jours et de 5 à 7 jours, dans les régions rurales.

L'analyse chimique des échantillons frais et déshydratés prélevés dans les endroits visités est reproduite dans le tableau 1. Elle représente la moyenne de 210 échantillons recueillis dans diverses fermes de villages différents. Ces échantillons avaient un taux d'humidité très variable, leur teneur en éléments nutritifs en étant également affectée.

Le questionnaire a révélé que la production moyenne par famille est d'environ 10 kg de gombo et 10 kg de guimauve potagère. L'observation la plus importante a été le contenu élevé d'impuretés dans les produits. Il semble que l'exposition au soleil n'a pas été suffisante pour arrêter l'action des enzymes et réduire l'infestation fongique. Le questionnaire a fait ressortir également des différences d'opinion concernant le nombre d'unités de séchage nécessaires, les cultivateurs préférant disposer de leurs propres séchoirs tandis que les pouvoirs publics, eux, préfèrent de grandes installations pouvant desservir une localité entière et assurer le traitement d'une variété de produits.

Mise au point de la déshydrateuse solaire

S'inspirant de ses constatations, le Laboratoire de l'énergie solaire a mis au point une déshydrateuse solaire de dimensions appropriées à l'usage communal, et pouvant effectuer le séchage de divers produits à forte teneur en humidité (> 75 %). L'installation comprend un séchoir solaire à air avec une surface d'absorption de 24 m², réchauffant l'air soufflé par un ventilateur centrifuge de 1,4 kW pouvant débiter 800 m³ à l'heure dans un cylindre. L'air chaud pénètre dans la chambre du séchoir à une élévation de pression de 10 à 15 cm d'eau. Le volume de la chambre est de 10 m³, et celle-ci est munie d'une cheminée pour équilibrer la pression de l'air et empêcher que les légumes ne soient projetés en tous sens à l'intérieur. Trois rangées superposées de claies en treillis d'acier inoxydable sont fixées aux parois de la chambre. La figure 1 donne une vue en coupe du capteur solaire.

Nous avons effectué divers essais afin de mesurer le taux de séchage des légumes à l'air chaud ; nous avons constaté qu'il atteignait son maximum durant les 3 premières heures. La durée de l'opération dépend de la teneur initiale en humidité, des propriétés du produit, de l'épaisseur de la couche sur les claies, de la vitesse de l'air, de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant.

Processus du séchage

Les tests de séchage effectués par notre équipe de recherche ont débuté à la fin de l'été, époque où les légumes sont plus abondants et leur prix au plus bas. La guimauve potagère et le gombo, provenant directement des champs en sacs de plastique, ont été lavés, blanchis et étendus ensuite en couches minces de 6 mm sur les claies. Ces dernières ont été placées dans la chambre du séchoir lorsque la température de l'air intérieur eût atteint 60 °C. On retournait les légumes deux fois par jour et toutes les heures, on relevait la température et l'humidité relative de l'air ambiant à son entrée dans la chambre et à sa sortie. Lorsque les valeurs relatives de l'humidité devenaient égales, on poursuivait le séchage pendant 2 autres heures de façon à abaisser la teneur en humidité du produit entre 10 et 13 %, la plus propice à un bon entreposage. Une fois le séchage terminé, on laissait refroidir les légumes

Tableau 1. Analyse chimique de produits frais et séchés au soleil.

Produits	Teneur en humidité (%)	Protéine brute (%)	Cellulose (%)	Extrait d'éther (%)	Hydrocarbones solubles (%)	Cendre (%)
Guimauve potagère						
Fraîche	83,26	3,83	1,71	0,41	8,03	2,76
Séchée au soleil	7,45	23,62	10,59	3,50	38,72	16,12
Gombo						
Frais	86,72	2,54	0,93	0,25	8,38	1,18
Séché au soleil	11,35	16,78	12,74	2,70	46,47	9,96

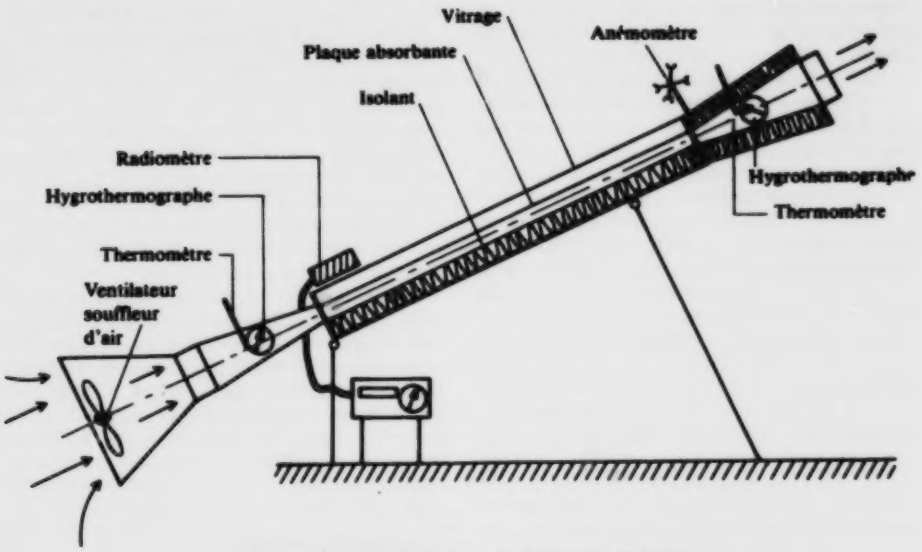

Fig. 1. Section transversale du capteur solaire.

pendant une heure, après quoi ils étaient mis dans des sacs de jute ou de nylon. Des prélèvements à l'état frais et sec ont été confiés au laboratoire pour en vérifier les teneurs en humidité, en protéine brute, en cellulose brute, en extrait d'éther, en hydrocarbones totaux, et en cendre (ACAO, 1968).

Le tableau 2 est un résumé des résultats expérimentaux du séchage de la guimauve potagère et du gombo, soumis chacun à deux expériences. L'un et l'autre ont été mis à sécher une fois en août et une fois en octobre. On n'a constaté aucune différence appréciable des poids entre les deux essais. Dans chaque cas le ventilateur n'était mis en marche que durant la période de séchage et son débit était de 800 m^3 d'air à l'heure.

La teneur initiale en humidité (TH) des produits frais n'était pas inférieure à 80 % et l'objectif était de l'abaisser à 10–15 %. La durée du séchage en octobre a été plus longue à cause de l'humidité relative plus élevée enregistrée à cette époque et de la diminution des heures d'ensoleillement.

Difficultés rencontrées

Les expériences de séchage effectuées durant les deux dernières années ont permis de constater que si le taux de séchage est trop élevé par suite d'une vitesse excessive de l'air, le produit a tendance à sécher particulièrement dans les couches superficielles ; après avoir été retirée du séchoir, cette surface s'humidifie de nouveau. Le surséchage des légumes ne se justifie pas, leur entreposage subséquent dans un air à humidité relative élevée entraînant une absorption de l'humidité atmosphérique jusqu'à ce qu'un équi-

Tableau 2. Sommaire des expériences de séchage de la guimauve potagère et du gombo.

Produits	Date de récolte	Quantité du produit (kg)		Durée du séchage (heures)	Température moyenne du séchage (°C)	Élévation moyenne du séchage (°C)	Moyenne de l'humidité enlevée (%)	Teneur en humidité du produit final (%)
		Entrée	Sortie					
Guimauve potagère	21/08/79	37,5	5,87	20	58,5	32	72,91	10,35
	03/10/79	20,5	3,10	25	53,5	29	72,90	10,36
Gombo	25/08/79	37,9	7,58	36	55,5	30	75,47	11,25
	10/10/79	36,0	7,00	44	54,0	28	76,17	10,55

libre s'établisse entre les deux. Ce surséchage a causé une perte considérable de feuilles chez certains légumes.

Effets du séchage sur la qualité

Les légumes déshydratés peuvent perdre quelques-uns de leurs éléments nutritifs au cours du traitement. L'oxydation est une cause primaire de perte, en particulier pour l'acide ascorbique, mais il se produit également des pertes d'autre nature. Il semblerait que le brunissement non-enzymatique réduise la valeur des protéines (Hendel, 1960).

Lewis et alii (1949) ont observé que le glucose réagit avec les acides acétique, citrique ou lactique dans un système utilisé comme modèle, et produit une pigmentation brune et de l'acide carbonique. L'oxygène accélère le processus. La chaleur est également considérée comme un facteur important dans les dommages subis par la protéine, qui sont dus alors à une relation durée-température. Il apparaît que les dommages dus à la chaleur ont beaucoup plus de chances de se produire lorsque la teneur initiale en humidité est élevée. D'après les résultats constatés au Laboratoire régional de recherche du ministère de l'Agriculture des États-Unis, les claies en treillis métallique réduiraient les pertes par séchage des pommes de terre passées au presse-purée ; nous avons donc utilisé des claies en acier inoxydable pour accélérer le séchage.

Il est très important pour le séchage des légumes verts que le produit obtenu soit bien accueilli par le consommateur. On peut en préserver la couleur et, en conséquence, la carotène par le blanchiment. De bonnes conditions d'entreposage contribueront également à préserver les qualités désirables.

Problèmes d'entreposage des légumes séchés

L'excès d'humidité contribuera à détériorer la qualité et, indirectement, à réduire la quantité. Même au prix d'une étroite surveillance, on ne saurait garantir que le produit entreposé sera exempt de moisissures ; l'infestation, en présence de l'humidité, augmentera le taux de respiration des fongus. L'émission de 14,7 g de CO_2 s'accompagne d'une perte de matière sèche de 1 % (Sinha, 1971). Le processus respiratoire est marqué par un dégagement de chaleur et d'eau et par l'augmentation consécutive de la teneur en humidité du produit, laquelle à son tour accroît la réaction jusqu'à ce que le légume se gâte.

Nos expériences ont prouvé que l'ensachage dans le nylon n'avait aucun effet défavorable sur la composition chimique du produit entreposé. L'analyse chimique n'a révélé aucune modification sérieuse ; la teneur en humidité, la protéine, l'extrait d'éther, la cellulose, les hydrates de carbone, le contenu de cendre n'ont presque pas varié. L'infestation fongique n'a pas dépassé 100 000 spores/g dans les échantillons examinés. Cependant, d'autres tests s'imposent avant d'être considérés comme concluants. Certains devront porter sur l'activité des enzymes, la détermination de l'aflatoxine, et la détérioration de la carotène et de la vitamine.

Travaux à venir

L'appréciation techno-économique de trois séchoirs solaires installés en différents endroits de l'Égypte révèle que nous avions surestimé la quantité d'acier (65 % du coût total) nécessaire à la construction du séchoir, ce qui a eu pour résultat d'augmenter le coût initial et, subséquemment, de réduire le profit (ratio coût et rendements de 1,23 à 1 et une période de remboursement de 4,7 ans). Un autre plan, actuellement, tient compte de ce facteur.

En dernière analyse l'on peut avancer que, une fois la décision prise par les responsables officiels de réduire les pertes post-récolte des produits alimentaires agricoles, on devra envisager sérieusement de recourir à la dessication, ce procédé pouvant éviter 20 % environ des pertes encourues normalement. La récolte hâtive diminue le déchet dans le champ et permet d'accroître les superficies disponibles pour d'autres plantes cultivées et d'améliorer la production grâce à l'ensemencement plus hâtif de la récolte suivante. Les pertes post-récolte de légumes imputables aux grandes distances séparant les lieux de production des marchés pourraient être sensiblement réduites, ainsi que le coût des transports. Les avantages économiques sont si considérables que l'on souhaiterait voir le séchage devenir pratique courante pour le plus grand bien de la collectivité agricole de l'Égypte.

Remerciements

MM. M. Shokry et A.H. Abdel Gawad ont apporté leur précieux concours dans la préparation des informations. Nos remerciements à Mme Fatma M. Salman qui a relevé les chiffres de cet article ainsi qu'à M. C. MacCormac pour son appréciation de la faisabilité technique des projets de séchoirs.

AOAC (Association of Official Agriculture Chemists). 1968. Official methods of analysis. (10th ed.). Washington DC, USA, AOAC.

Hendel, C.E. 1960. Effects of drying and dehydration on food nutrients. In: Harris, R.F. et Loesecke, H. von, eds., Nutritional evaluation of food processing. 148-157. 1st ed.

Lewis, V.H., Esselen, W.B., Jr. et Fellers, C.R. 1949. Nonenzymatic browning of foodstuffs. Production of carbon dioxide. Industrial and Engineering Chemistry, 41, 2587-2591.

Sinha, R.N. 1971. Interrelationship of physical, chemical and biological variables in the deterioration of stored grains. In: Sinha, R.N. et Muir, W.E., Grain Storage part of a system. Connecticut, USA, AVI Publishing Co., Inc.

Le séchage des pommes de terre (*papa seca*) au Pérou

C. Lescano[1]

Résumé Un procédé a été mis au point à l'échelle du laboratoire permettant d'obtenir deux catégories de *papa seca* de meilleure qualité : extra (> 8 cm de diamètre) et première classe (6,5 à 8 cm de diamètre). Le procédé comprend un classement, le lavage mécanique, l'épluchage par abrasion, le découpage en bâtonnets (1 × 1 × 4 cm), la cuisson à la vapeur (1,7 kg/cm² de pression absolue), le séchage à l'air chaud (température de 50 °C état sec), le broyage et l'ensachage.

Les expériences de séchage de la pomme de terre cuite à l'aide d'une armoire-séchoir de laboratoire ont démontré les points suivants : les variétés de tubercules à faible teneur d'extraits solides (Yungay, Ticahuasi et Revolucion) ont donné un produit de meilleure qualité que les variétés plus riches en solides ; la gélatinisation de la fécule affecte les isothermes d'absorption de l'eau et ralentit le taux du séchage, comparativement aux pommes de terre crues ; l'absence de la période de séchage à régime constant et l'existence de plus de trois périodes à régime décroissant dans le cas des bâtonnets (1 × 1 × 4 cm) et des tranches (1 × 5 cm de diamètre).

Plusieurs pays en développement sont situés dans des zones tropicales propices à la culture de la pomme de terre. Ce n'est cependant que dans la région andaise de l'Amérique du Sud, où ce tubercule aujourd'hui cultivé a existé primitivement à l'état sauvage, que la pomme de terre joue un rôle important dans l'alimentation humaine. Au Pérou, la consommation par tête atteint 142 kg par an et s'élève à 288 kg dans l'Altiplano péruvien (Christiansen, 1977).

Il est reconnu que la pomme de terre produit plus de calories, de protéine et de vitamines et minéraux essentiels, par unité de superficie et de temps, que les principales cultures céréalières et que d'autres plantes-racines. Cependant, la production et l'utilisation des tubercules frais comme aliment bon marché dans les pays en développement sont freinées par des difficultés d'entreposage, de transport et de distribution propres à ce produit volumineux, à forte proportion d'eau et extrêmement périssable, ainsi que par les fluctuations saisonnières des prix.

Procédés traditionnels de conservation

Pour remédier à ces inconvénients, de meilleurs moyens de préservation s'imposent. Dans l'Amérique du Sud, les méthodes auxquelles on a recours se perpétuent depuis des siècles. Aujourd'hui encore elles comportent des techniques primitives de dessiccation. De façon générale, les pommes de terre choisies pour être ainsi préparées ne peuvent être consommées à l'état frais. Les variétés amères, les seules que l'on cultive dans les plus hautes vallées (parfois à plus de 3600 m d'altitude), sont transformées en *chuño*. Les variétés courantes, non amères, cultivées dans les régions moins élevées servent à la préparation de *papa seca* et, en plus faible proportion, de fécule.

Chaque famille prépare elle-même sa *papa seca*. Celle-ci provient généralement de tubercules avariés ou partiellement gâtés, bouillis, épluchés, hachés et séchés au soleil. Après séchage, la *papa seca* est fréquemment moulue. Le produit obtenu, de couleur brune, est composé de particules de diverses grosseurs et contient, fréquemment, de la terre et du gravier.

La *papa seca*, très populaire partout au Pérou, entre pour une bonne part dans la préparation d'un plat national, le *carapulca*, composé de *papa seca* préalablement rôtie et ensuite bouillie dans de l'eau avec du porc, des tomates, des oignons et de l'ail. Plusieurs familles qui préparent la *papa seca* tirent un supplément de revenu de la vente de leur excédent aux marchés ruraux et urbains.

1. Departamento de Tecnologia de Alimentos y Productos Agropecuarios, Universidad Nacional Agraria La Molina, Apartado 456, Lima, Péru.

Mise au point d'une méthode améliorée

Grâce à une subvention de deux ans du Centre de recherches pour le développement international (CRDI), la Universidad Nacional Agraria (UNA), à La Molina, Lima (Pérou) en vertu d'un sous-contrat avec le Centre international de la pomme de terre (CIP), est à mettre au point une méthode coopérative à l'échelon du village devant permettre la préparation de la *papa seca* pour la vente aux marchés ruraux et urbains. Le présent exposé se concentre sur l'opération unitaire du séchage dans le cadre du procédé de laboratoire élaboré pour la production de *papa seca*, aux termes des objectifs généraux et particuliers du projet CRDI-UNA-CIP.

Ce projet de laboratoire a été conçu en vue d'utiliser les pommes de terre de catégories extra (> 8 cm de diamètre) et de première classe (6,5 à 8 cm de diamètre). Le procédé comporte : classement, lavage mécanique, épluchage par abrasion, découpage en bâtonnets, cuisson à la vapeur, séchage à l'air chaud, mouture et empaquetage. (La *papa seca* séchée peut rester entreposée durant 3 à 4 ans en sacs de polyéthylène.)

Les résultats de ces travaux expérimentaux feront ressortir l'influence des caractéristiques des tubercules sur le processus. Van Arsdel a traité en détail de la corrélation entre la température, l'humidité et la vitesse de l'air circulant autour du produit à sécher (Van Arsdel et alii, 1973).

Nous disposons déjà de certaines informations techniques sur le séchage de la pomme de terre (Ede et Hales, 1948 ; Van Arsdel, 1951 ; Gorling, 1958 ; Saravocos et Charm, 1962). Cependant, tous les résultats rapportés concernaient la pomme de terre blanchie ou échaudée et non plus le séchage de la pomme de terre cuite dans lequel la gélatinisation des granules de fécule et le comportement de cette dernière paraissent avoir de l'importance. Lorsque l'objectif final est l'obtention de farine, il peut être utile de congeler préalablement le produit, mais la *papa seca*, doit avoir une coloration jaune et la congélation la rend blanche.

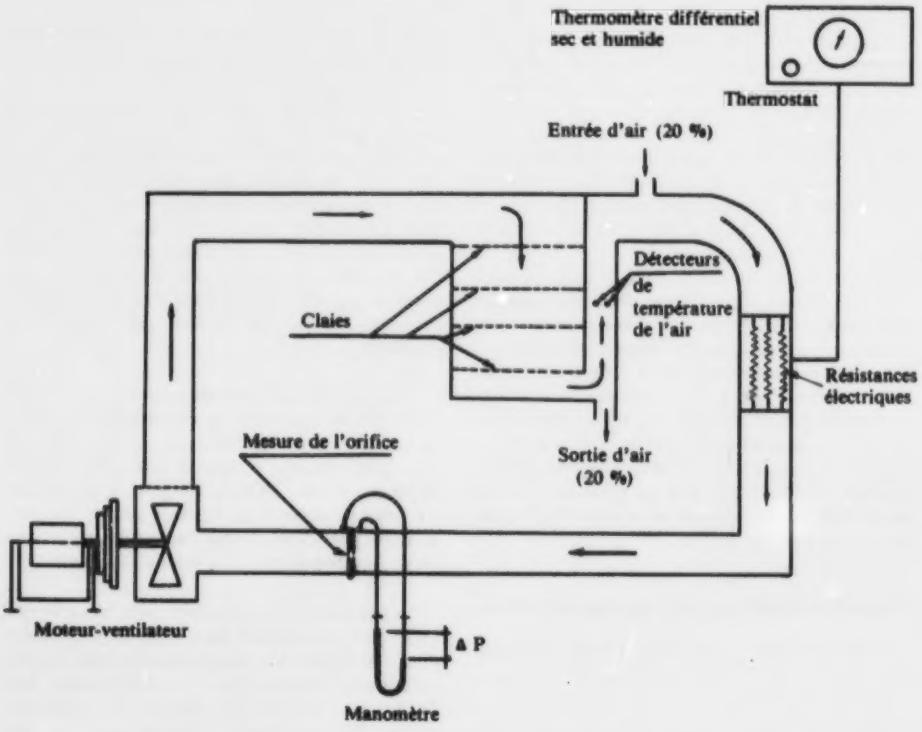

Fig. 1. Schéma du séchoir de laboratoire à claies.

La figure 1 représente le séchoir expérimental de laboratoire. Les températures à l'état sec et humide peuvent être enregistrées tout au long de l'opération par le thermomètre différentiel, tandis qu'un thermostat règle la température de l'air dont on peut aussi obtenir quatre vitesses, soit 6, 4, 2,8 et 1,32 m/sec. (La capacité du séchoir solaire indirect au stade pilote est de 2 kg/2 jours.)

Les échantillons utilisés dans les tests de séchage provenaient des variétés Ticahuasi, Yungay, Revolucion et Amarilla, de catégories extra et première classe ; les tubercules avaient été épluchés mécaniquement par abrasion et cuits à la vapeur à 1,7 kg/cm² de pression absolue durant 10 minutes pour l'Amarilla et 12 minutes pour les Ticahuasi, Revolucion et Yungay.

Résultats

Un point important à souligner est que la *papa seca* se prépare à partir de pommes de terre cuites. La figure 2 présente les isothermes d'absorption pour les tubercules crus et cuits et pour la *papa seca* (variété Yungay). On remarquera la différence sensible entre le produit séché et non séché. La différence entre les pommes de terre cuites (à la vapeur) et les crues s'explique par la gélatinisation des granules de fécule et les modifications de la structure physique consécutives à la cuisson. Les modifications physiques et chimiques ainsi causées affectent également les taux de séchage : les tubercules cuits à la vapeur, par exemple, sèchent plus lentement que les crus.

La variété utilisée s'est révélée une variable importante dans la préparation de la *papa seca*. La qualité du produit obtenu est supérieure avec les pommes de terre ayant une teneur en humidité (TH) plus élevée. Une proportion élevée d'extraits solides (variétés indigènes) affecte la structure du produit, même si ces tubercules sèchent plus vite et consomment moins d'énergie. Toutefois, ils se désagrègent facilement en trop petites particules après le broyage et, une fois réhy-

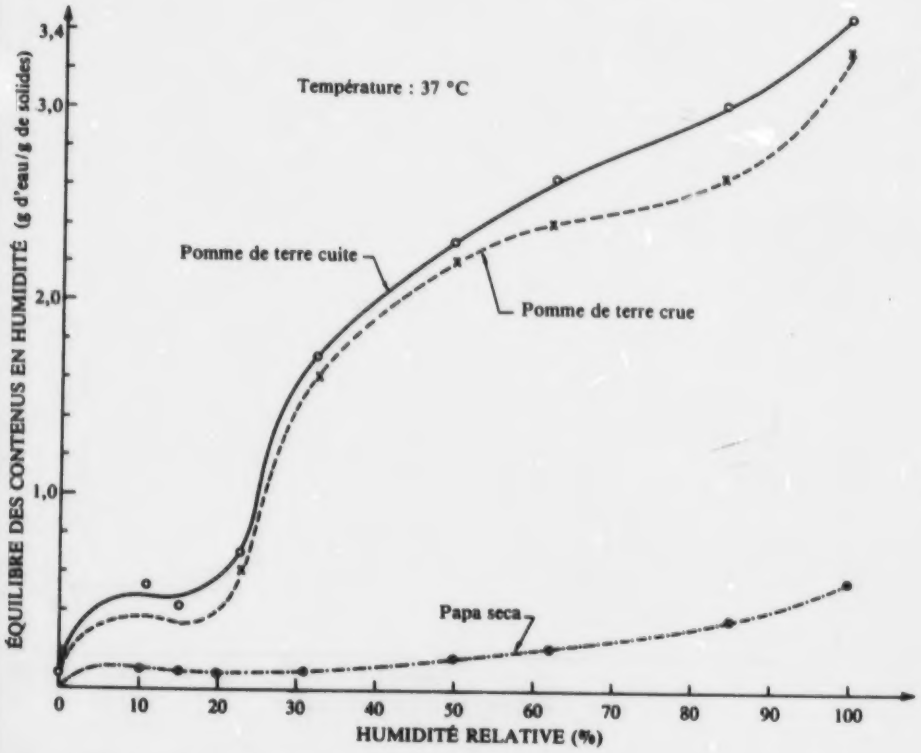

Fig. 2. Isothermes d'absorption de l'eau de la pomme de terre (variété Yongay) crue, cuite et en papa seca.

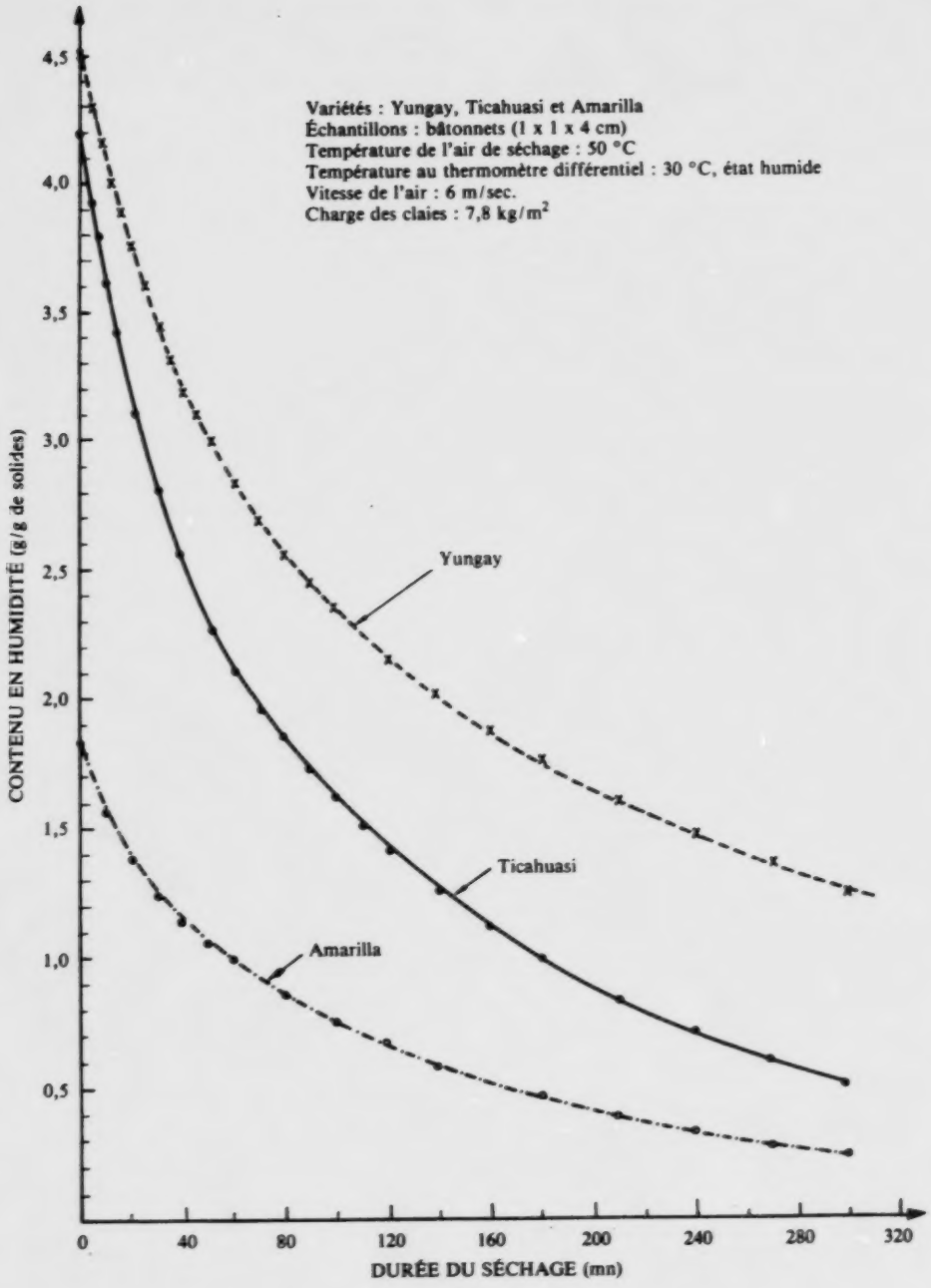

Fig. 3. Préparation de la papa seca *montrant l'influence de la variété sur le séchage.*

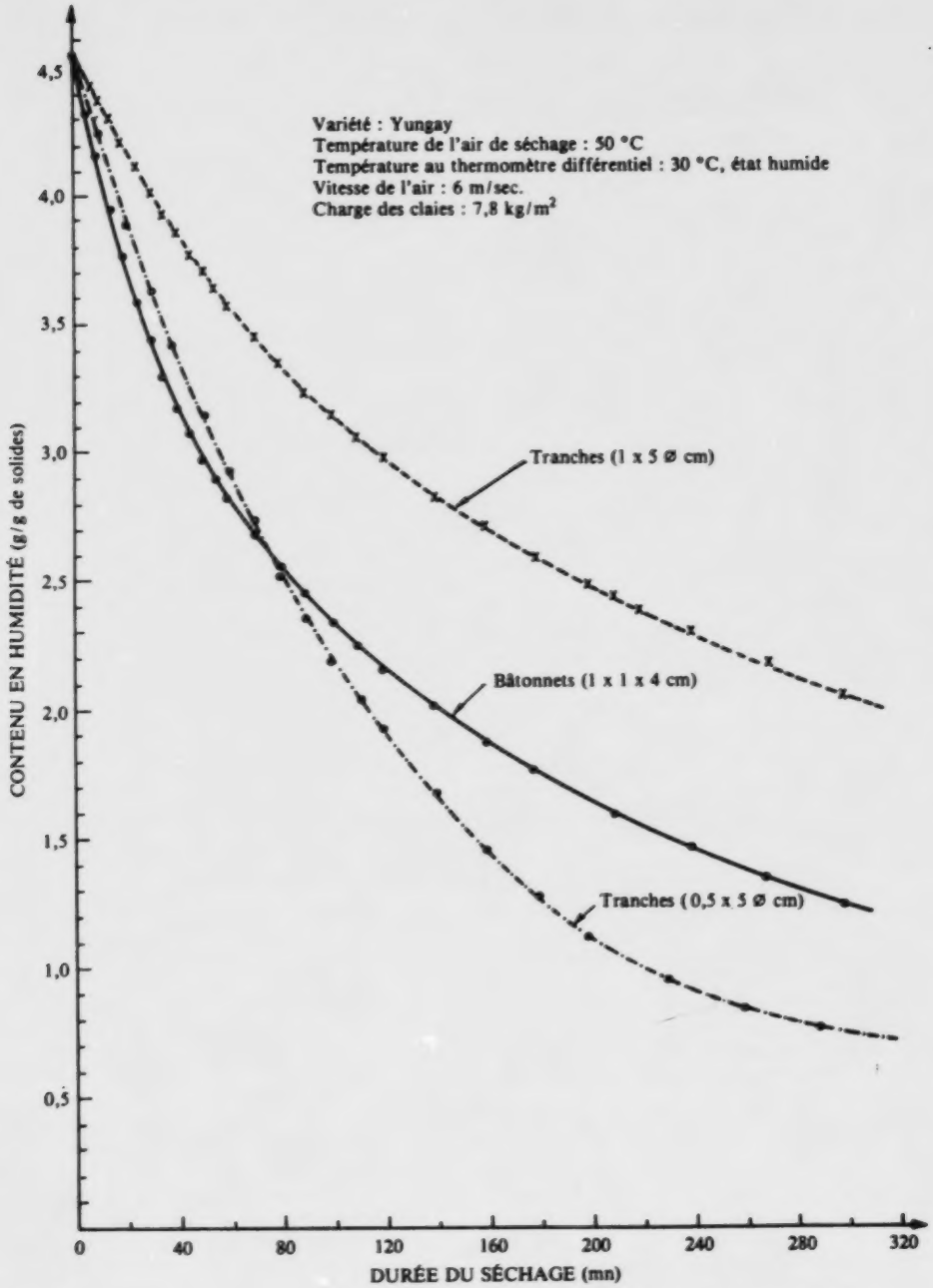

Fig. 4. Préparation de la papa seca *montrant l'influence de la forme (bâtonnets et tranches) et des dimensions des échantillons sur le séchage.*

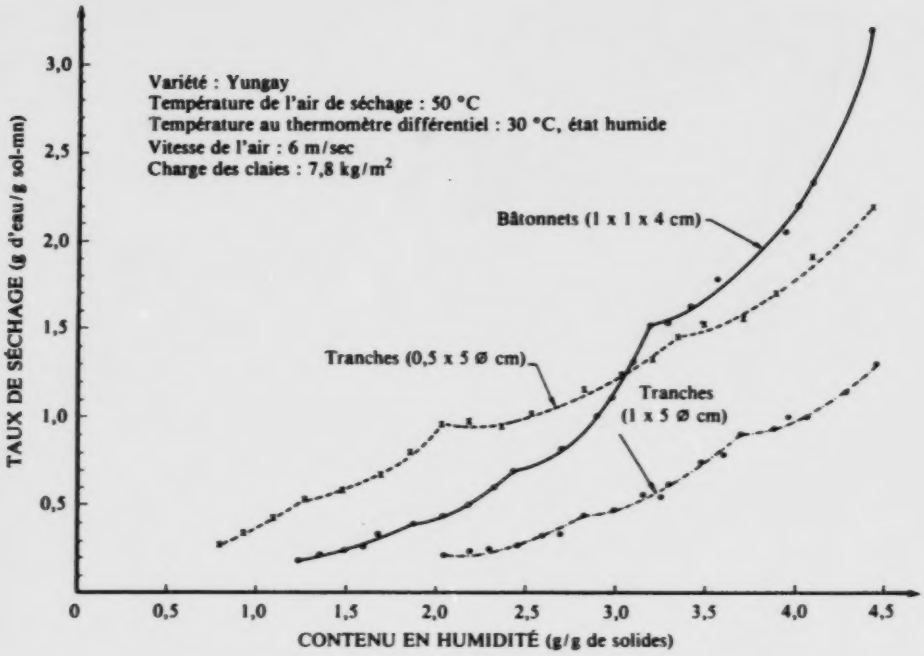

Fig. 5. Préparation de la papa seca *montrant l'influence de la forme (bâtonnets et tranches) et des dimensions des échantillons sur les taux de séchage.*

dratés, prennent l'aspect d'une purée dépourvue des particules de formes et de dimensions bien distinctes qui doivent caractériser la *papa seca* de bonne qualité. Les variétés Yungay et Ticahuasi ont une faible teneur en matières solides (22,7 et 21,36 % respectivement) tandis que l'Amarilla en possède une forte proportion (29,51 %). La figure 3 reproduit les courbes de séchage de ces trois variétés. L'Amarilla séchera plus rapidement que les Yungay et Ticahuasi, mais seules les deux variétés possédant une teneur en humidité élevée produiront une *papa seca* de qualité satisfaisante.

La forme et les dimensions du produit mis à sécher influent sur le processus. Les figures 4 et 5 font voir que les bâtonnets (1 × 1 × 4 cm) sécheront plus rapidement que les tranches de 1 cm d'épaisseur et de 5 cm de diamètre, et que si l'épaisseur de ces dernières n'est que de 0,5 cm, le séchage est accéléré. La figure 5 indique également que, dans les conditions où les tests ont eu lieu, les bâtonnets et tranches provenant de pommes de terre cuites à l'eau ne présentent que des périodes de séchage à régime décroissant, avec des formes semblables à celles obtenues par Gorling (1958).

Christiansen, J.A. 1977. The utilization of bitter potatoes to improve food production in the high altitudes of the tropics. Connecticut, USA, Cornell University (thèse de doctorat inédite).

Ede, A.J. et Hales, K.C. 1948. The physics of drying in heated air, with special reference to fruit and vegetables. Great Britain, Department of Scientific and Industrial Research, Food Investigation Board, Special Report 53.

Gorling, P. 1958. Physical phenomena during the drying of foodstuffs. In: Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs. New York, USA, Macmillan Co.

Saravacos, G.D. et Charm, S.E. 1962. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. Food Technology, 16(1), 78-81.

Van Arsdel, W.B. 1951. Principles of the drying process — with special reference to vegetable dehydration. U.S. Department of Agriculture, Bureau Circulation, AIC-300.

Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. et Morgan, A.I., Jr. 1973. Food dehydration (2nd ed.) Vol. 1. Connecticut, USA, AVI Publishing Co., Inc.

Le séchage du paddy en Indonésie

Suahyadi[1]

Résumé Plusieurs études ont été effectuées en Indonésie sur le séchage artificiel du paddy (riz non décortiqué), pour pallier les inconvénients du mode traditionnel de séchage au soleil. Comparativement à ce dernier, le séchage artificiel donne un riz usiné de meilleure qualité surtout grâce à un faible taux de grains brisés, jaunes ou avariés. Autres avantages du procédé artificiel qui semblent prometteurs, mais doivent encore être approfondis : rendement à l'usinage plus élevé, meilleure résistance aux parasites et aux moisissures, et durée prolongée en entrepôt. Toutefois, du point de vue du cultivateur, les avantages économiques du séchage artificiel restent douteux mais, en raison de l'intérêt que lui accordent les pouvoirs publics, on encourage l'utilisation des séchoirs artificiels. Le procédé pourra résoudre dans une certaine mesure les problèmes observés dans la conservation à long terme du riz usiné mais on devra s'efforcer d'en réduire le prix de revient.

Depuis 1970, le gouvernement de l'Indonésie encourage l'adoption de séchoirs mécaniques par le secteur privé, afin d'aider la petite industrie. Le coût du séchage pour différents modèles a varié de 742 NRPH/t (630 NRPH = 1 $US) à 1 648 NRPH, tandis que celui du séchage au soleil n'était que de 300 NRPH/t de riz brut. À l'époque où ces coûts ont été relevés l'utilisation de séchoirs artificiels était fort restreinte ; les installations, outre leur prix élevé, étaient assez compliquées et difficiles à opérer. Par ailleurs, il n'est pas toujours possible de substituer le séchage solaire au séchage artificiel. Les conditions atmosphériques défavorables restreignent souvent le premier, et les retards apportés à l'opération entraînent fréquemment la détérioration du grain.

Avantages d'une bonne méthode de séchage

Au moment de sa récolte, le paddy a une teneur en humidité (TH) de 20 à 22 % par beau temps, mais celle-ci peut s'élever entre 24 et 27 % après une pluie et, dans ces conditions, le grain risque de s'avarier rapidement, parfois dans les 24 heures, à moins d'être aéré. En réduisant à 16 % la TH du riz brut immédiatement après la moisson, le grain restera de bonne qualité durant 3 à 6 mois (les cultivateurs s'efforcent généralement de sécher de bonne heure leur grain au soleil afin d'obtenir ce 16 % qui leur permettra de le conserver pendant plusieurs mois).

Lorsque le paddy est entreposé à l'état humide, le grain se décolore. La respiration considérable du grain fortement humide provoque de l'échauffement qui, à son tour, l'avarie et favorise le développement des moisissures.

Le grain décoloré est l'indice le plus apparent de sa détérioration, et la dévalorisation consécutive du produit peut atteindre 25 à 30 %, comparativement au riz sain. Il est difficile de connaître la proportion de riz catégorisé comme décoloré. En effet, BULOG, le Bureau national de logistique, seul organisme responsable de la stabilisation des prix, fixe certaines normes prohibant notamment les grains jaunes ; le grain non conforme aux normes imposées est refusé et offert au marché libre à des prix inférieurs. Même si BULOG fixe les normes en question, il arrive que l'organisme subisse des pertes dues à des grains avariés, le plus souvent achetés à l'état brut. (En 1981, au moins 16 000 t ont subi une baisse de prix de 25 % ou plus et, dans le passé, cette baisse a touché près de 10^5 t.) En recourant à des procédés de séchage appropriés, on pourrait éviter d'aussi fortes proportions de grains jaunes ou avariés et supprimer bon nombre des problèmes auxquels on doit faire face après la récolte.

Grâce au séchage artificiel, le riz séché à l'état brut pourrait donner un grain usiné de qualité supérieure, à condition d'éviter les températures de séchage trop élevées. Le tableau 1 permet de

1. National Logistics Agency (BULDG), P.O. Box 2345, Jakarta, Indonesia.

Tableau 1. Comparaison du séchage au soleil et du séchage artificiel du riz usiné.

	Séchage au soleil[a] (%)	Séchage artificiel (%)
Teneur en humidité	14	14
Grain de I^re^ qualité	65	85
Grains brisés	35	13
Déchets	2	2
Rendement à l'usinage	65	>65[b]

a) Représentant la norme des livraisons nationales, d'après BULOG.
b) Le rendement à l'usinage du séchage artificiel est peut-être plus élevé, mais il est difficile d'obtenir un échantillon adéquat.

comparer le grain usiné séché au soleil et par voie artificielle. Le procédé artificiel a, comme autre avantage, d'améliorer la résistance du grain aux insectes et aux moisissures. La facilité de conservation en entrepôt peut également en être améliorée, mais d'autres études s'imposent sur ce point.

Coûts comparatifs du séchage au soleil et du séchage artificiel

En 1970-1971, la société Weitz-Hettelsater, Missouri (É.-U.) a étudié les coûts respectifs de plusieurs séchoirs et celui du séchage au soleil. Elle a constaté que la différence entre le séchage au soleil et le procédé artificiel est considérable, soit respectivement 300 NRPH/t de riz brut et 742 NRPH/t, et qu'il existe aussi des différences sensibles entre les séchoirs (742-1 648 NRPH/t).

En 1976, le ministère de l'Agriculture effectuait la même enquête. Il constatait que la plupart des séchoirs à fond plat procuraient un prix de revient relativement bas, leur consommation d'énergie s'avérant la plus faible et leurs exigences en main-d'oeuvre minimes. En conséquence, tous les genres de séchoirs envisagés pour l'Indonésie devraient être techniquement simples et consommer peu d'énergie afin de réduire autant que possible le coût de l'opération.

En 1978, BULOG et le CRDI ont également fait l'étude comparative du séchage au soleil et du séchoir artificiel à fond plat mis au point dans le projet BULOG/CRDI. Les résultats ont confirmé ceux de l'étude précédente. Le coût du séchage au soleil a été de 1500 NRPH/t de riz brut, comparativement à 3500 NRPH avec le séchoir à fond plat.

Malgré la grande économie apparente du séchage au soleil, on est obligé de recourir aux séchoirs artificiels lorsque les conditions climatiques ne permettent pas l'emploi de l'autre procédé. BULOG a donc procédé à l'installation, dans des coopératives de villages, de 71 séchoirs qui seront bientôt suivis de 40 autres, ainsi que de 60 petits séchoirs à fond plat.

Inconvénients des séchoirs artificiels

Les séchoirs artificiels possèdent plusieurs avantages techniques, mais divers inconvénients restent à surmonter au point de vue économique. Ils ne se révèlent vraiment avantageux que lorsque la saison des pluies rend impossible le séchage au soleil. Dans les autres cas, ce dernier est beaucoup plus économique. En pratique, la plupart des séchoirs ne peuvent guère servir que durant quatre semaines. Le recours au séchage artificiel ne peut donc être rentable que là où la moisson du riz doit souvent s'effectuer à la saison des pluies, comme dans les régions montagneuses où le riz est cultivé sans interruption, et aussi dans les régions bien irriguées où, à cause du rationnement de l'eau, la moisson doit avoir lieu dans la saison pluvieuse.

Un facteur non technique qui a poussé à l'utilisation des séchoirs artificiels est le fait que le riz reste, dans ce pays, une denrée politique. La famille moyenne, en Indonésie, consacre environ 30 % de son budget à l'achat de riz. Les pouvoirs publics doivent donc veiller à la stabilisation des prix de cette denrée comme moyen de stabiliser l'économie nationale.

Analyse économique de l'usage des séchoirs artificiels

Une étude de faisabilité économique de l'utilisation des petits séchoirs à fond plat (d'une capacité de 1500 kg à la fois), étude confiée aux économistes du projet BULOG/CRDI, a établi que les investissements sous forme de séchoirs artificiels ne remplacent pas ceux que l'on devrait effectuer pour accroître l'espace servant au séchage solaire ; que les pertes quantitatives en l'absence de séchage solaire durant la moisson en saison de pluies sont de l'ordre de 4 % ; et que le prix du combustible est coté aux prix du commerce. L'analyse révèle que le rapport entre le prix coûtant et le bénéfice, en ce qui concerne le séchage artificiel (au taux d'escompte de 18 %), a peu de chance de dépasser +1 en l'absence de nouvelles subventions officielles en faveur du procédé artificiel. Une autre analyse, par un volontaire du Service universitaire canadien outre-mer (CUSO) affecté au projet, concernait

les possibilités d'utilisation d'un petit séchoir à fond plat, d'un séchoir à caisson vertical chauffé au pétrole, et d'un autre à caisson vertical, chauffé par les balles de riz. Le modèle envisageait les éventualités suivantes : trois coûts de circonstance pour la main-d'oeuvre (salaires élevés, bas et nuls) ; que l'utilisation éventuelle de séchoirs artificiels vienne remplacer des investissements supplémentaires pour le séchage solaire ; et l'influence des conditions atmosphériques observées dans la région de Jatisari (1970-1980), l'une des grandes productrices de riz où la saison des pluies cause souvent de sérieuses difficultés pour le séchage au soleil.

Mentionnons les points suivants parmi les conclusions de l'analyse : (1) il est peu probable que les séchoirs artificiels se révèlent un procédé efficace à l'échelon coopératif à moins que l'on n'utilise les balles de riz comme combustible ; (2) la rentabilité des séchoirs artificiels sera sujette à des fluctuations prononcées d'une année à l'autre en raison du temps qui pose de sérieux problèmes aux entreprises ou coopératives qui ne peuvent compter sur des crédits faciles à long terme ; (3) la rentabilité des séchoirs artificiels dépend, de façon critique, d'investissements pouvant suppléer à l'absence de ces séchoirs, et des possibilités existantes de réduire les pertes par séchage sur le sol à 1 % environ — si l'on n'envisage pas les séchoirs artificiels comme devant se substituer à de nouveaux investissements sous forme de moyens de séchage au soleil, ou s'il est possible de réduire sensiblement les pertes au sol au cours de ce dernier (comme l'ont allégué d'autres chercheurs en Indonésie), le déboursé représenté par les séchoirs artificiels ne sera pas justifié, dans de telles conditions ; (4) les pouvoirs publics indonésiens, depuis longtemps, subventionnent indirectement mais très généreusement l'adoption par le secteur privé de séchoirs artificiels (les subventions pour le combustible augmentent d'environ 1 % le taux interne de rapport des séchoirs à fond plat et à caisson vertical chauffés au pétrole et utilisés durant la saison des pluies) ; néanmoins, le secteur privé comme les coopératives n'ont adopté le séchage artificiel que lorsque les pouvoirs publics subventionnent entièrement, en plus, les dépenses d'investissement. Cet ensemble de constatations tend à démontrer que l'usage de séchoirs artificiels n'est pas encore économiquement viable, malgré les avantages techniques qu'on peut leur attribuer.

Conclusions

(1) L'utilisation de séchoirs artificiels améliore la qualité du riz usiné.

(2) Un des avantages attribuables aux séchoirs artificiels réside peut-être dans certaines améliorations des conditions d'entreposage à long terme, etc., mais il dépend de changements éventuels dans la qualité demandée du riz usiné et ce sujet devra être étudié plus à fond.

(3) A l'heure actuelle, l'usage de séchoirs artificiels n'est pas encore économique, ou reste en doute. Cependant, à cause de la politique alimentaire des pouvoirs publics en Indonésie, cet usage est encouragé.

(4) D'autres études devraient porter sur des procédés plus économiques de séchage artificiel du riz, ou sur d'autres méthodes comme des séchoirs solaires peu coûteux susceptibles de résoudre les problèmes que pose cette opération pendant les périodes pluvieuses, ou pouvant servir de complément au séchage au soleil.

Les effets du séchage sur la valeur nutritive des produits alimentaires au Kenya

M.I. Gomez[1]

Résumé On a effectué l'analyse du contenu des légumes en vitamine C et en carotène. Quatre espèces ont été choisies et soumises à une déshydratation par le soleil avec et sans photoprotection. Deux traitements préalables leur avaient été appliqués : blanchiment à la vapeur et sulfitage, et l'on a évalué la rétention de carotène dans les produits déshydratés obtenus. Une étude-témoin a été effectuée sur des produits séchés à l'ombre à la température ambiante et soumis aux mêmes traitements préalables. La papaye et la mangue, de la même façon, ont subi respectivement le blanchiment et un traitement préalable à l'acide citrique et au sucrose et l'on a relevé la rétention de la vitamine C et de la carotène dans les produits obtenus.

La rétention de carotène dans les traitements avec séchage à la température ambiante a été moindre qu'avec le séchage solaire, les pertes se poursuivant durant l'entreposage. Le séchage à l'abri de la lumière a donné une rétention plus élevée qu'avec le séchage à la lumière, et le blanchiment à la vapeur a amélioré nettement la rétention. La papaye a conservé au séchage sensiblement plus de vitamine C que la mangue, tandis que cette dernière l'emportait en ce qui concerne la carotène. Le blanchiment à la vapeur de la mangue avant le séchage a entraîné des pertes appréciables d'acide ascorbique et de carotène.

Des enquêtes sur la nutrition au Kenya ont permis de découvrir divers problèmes dus à des déficiences en oligo-éléments, notamment en vitamines A et C, riboflavine, acide folique, calcium et fer (Bhodal et alii, 1969 ; Keller et alii, 1969 ; Burrows, 1975 ; Steenberger et alii, 1978). En l'absence d'un régime approprié contenant des protéines animales, les légumes et les fruits constituent les sources les plus économiques et les plus abondantes de ces oligo-éléments. Les données concernant la valeur nutritive des légumes verts feuillus (LVF) révèlent qu'ils contiennent de bonnes quantités de carotène β, de vitamine C, d'acide folique, riboflavine, calcium et fer. Les fruits sont également une bonne source de vitamine C, de carotène et de minéraux. Cependant, l'abondance de fruits et de légumes est saisonnière et ils sont particulièrement rares durant les longues périodes de sécheresse. Le recours à de simples techniques de déshydratation au soleil à l'échelle rurale permettrait non seulement un approvisionnement à longueur d'année mais réduirait le gaspillage de ces produits très périssables durant les périodes de surabondance.

Les fruits et les légumes constituant une source précieuse d'oligo-éléments alimentaires, les techniques de déshydratation devraient en outre assurer qu'ils en conserveront le plus possible après le séchage. Même si la teneur en minéraux des fruits et des légumes reste stable une fois déshydratés, les vitamines, elles, sont extrêmement instables et sont détruites par l'action des enzymes et des mécanismes d'oxydation et de photodégradation. Le potentiel de conservation que peut offrir la déshydratation solaire des aliments est reconnu dans les pays comme le Kenya, mais la préservation des éléments nutritifs est une question importante, intéressant directement les problèmes reliés aux déficiences actuelles en oligo-éléments. C'est pourquoi, dans ces pages, la déshydratation solaire de divers fruits et légumes est envisagée du point de vue des modifications subies par les éléments nutritifs et par la qualité pendant ce processus et durant l'entreposage.

Légumes verts feuillus

Les légumes verts feuillus, y compris diverses

1. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Nairobi, P.O. Box 29053, Kabete, Nairobi, Kenya.

espèces indigènes sauvages, sont appréciés par la population, quand celle-ci peut se les procurer (Fig. 1). Ils se font cependant rares à certaines époques et disparaissent complètement du régime à la saison sèche. Seize espèces de légumes verts feuillus ont été étudiées pour leur teneur en vitamine C, et 18 espèces pour leur teneur en carotène β (Tableaux 1 et 2). De ce nombre, quatre espèces (feuilles de manioc, feuilles de niébé, chou frisé et amarante) ont été choisies, d'après leur contenu en éléments nutritifs et la faveur dont ils jouissent, pour servir aux tests de déshydratation solaire. On avait d'abord étudié la rétention de la carotène de ces espèces après déshydratation.

On a utilisé pour les expériences un séchoir solaire ordinaire en caisson, formé d'un coffre en bois peu profond, avec couvercle et ouvertures d'aération latérales et à la base. Le cadre du couvercle était recouvert d'une double pellicule de polyéthylène transparente. Les feuillages, après les traitements préalables ont été placés sur des claies à fond en treillis et mis dans le séchoir. Le séchage à la lumière et à l'obscurité s'effectuait en interposant une pellicule en polyéthylène noire à la base du couvercle d'une des chambres, tout en gardant l'autre exposée au jour.

Séchage

Le matériel frais, blanchi à la vapeur et sulfité, a été soumis à trois traitements déshydratants (à température ambiante, séchage à l'ombre, et séchage au soleil, dans l'obscurité et exposé à la lumière). La qualité du produit obtenu, la stabilité de conservation et la réhydratation ont atteint leur plus haut point lorsque la teneur en humidité (TH) du produit obtenu se situait entre 6 à 8 %. Pour atteindre cette proportion, le séchage à l'ombre à température ambiante a duré 4 à 6 jours, alors que le séchage au soleil l'obtenait

Tableau 1. Valeur nutritive de 16 légumes du Kenya.

	Vitamine C (en mg/100 g de poids frais)	
	Écarts	Moyennes
Herbes africaines arachnoïdes	171,8–212,0	158,4
Feuilles de fèves	101,1–150,8	130,8
Chou	21,6–46,3	26,9
Feuilles de manioc	148,0–400,8	310,8
Feuilles de taro	—	47,5
Feuilles de coriandre	87,0–120,6	113,0
Feuilles de niébé	56,4–123,0	91,9
Épinard E.A.	116,3–293,0	169,0
Erucastrum arabicum	80,5–94,9	90,6
Fenugree	114,0–140,5	133,0
Chou frisé	122,3–260,2	200,2
Laitues	2,0–10,4	8,6
Morelle noire	109,6–158,6	141,5
Feuilles de pomme de terre	75,6–92,1	82,0
Feuilles de citrouille	28,8–43,1	30,8
Bette à cardes	64,2–90,0	71,4

Fig. 1. Au Kenya, divers légumes feuillus sont offerts en vente après la saison des pluies.

Tableau 2. Contenu en carotène β et en humidité de 18 variétés de légumes feuillus verts.

	Humidité (%)[a]	Carotène (µg/ 100 g poids frais)	
		Écarts	Moyennes
Amaranthus hybridus	88,3	6750-8750	7416
Beta vulgaris	90,9	4875-7375	6125
Brassica oleracea, var. *acephala*	88,2	6625-8500	7312
Brassica oleracea, var. *capitata*	91,6	1050-1163	1156
Corchorus olitorius	85,4	8250-9150	8750
Colocasia esculentis	79,8	9500-9952	9700
Crotalaria brevidens	84,8	6250-7750	7000
Cucurbita pepo	80,6	7750-9000	8375
Cucurbita, sp.	87,4	7875-9125	8291
Erucastrum arabica	85,9	7750-7500	7625
Galinsoga parviflora	83,9	7250-7563	7375
Gynandropsis gynandra	81,8	8500-8900	8675
Latuca sativa	90,5	25-40	38,3
Manihot utilissima	66,3	12125-14675	12237
Phaseolus vulgaris	72,4	9500-11216	10650
Solanum nigrum	86,7	7500-7750	7625
Solanum tuberosum	90,5	10823-11520	10652
Vigna unguiculata	85,1	8250-10500	9416

a) Moyenne de quatre échantillons.

en 4 à 6 heures. Les échantillons déshydratés ont été emballés dans des sacs de polyéthylène et sont restés entreposés à l'abri de la lumière et à la température du local, pendant 3 mois.

Des différences entre espèces ont été observées dans leurs propriétés de rétention, d'après la chaleur physique et la stabilité du flétrissement, et d'autres facteurs intrinsèques. Dans toutes les conditions, les feuilles de manioc ont démontré des propriétés rétentives exceptionnelles, atteignant de 70 à 100 % pour la carotène, tandis que le chou frisé ne dépassait pas un maximum de 58 %. Les feuilles de niébé ont retenu près de 80 % de leur carotène dans quatre des traitements, mais l'amarante n'a pu en faire autant que dans les traitements par déshydratation solaire à l'obscurité, blanchiment à la vapeur, et sulfitage. Dans les séchoirs directs, la coloration du produit a de l'importance. Si elle est foncée, le séchoir est plus efficace.

Déshydratation à la température ambiante

La déshydratation à la température ambiante a produit la plus faible rétention de carotène chez le chou frisé et l'amarante, soit 20 et 40 % respectivement. Avec 60 %, la rétention a été un peu meilleure chez le niébé. Le manioc a été le moins affecté, conservant plus de 90 % de sa carotène primitive. Toutefois, les pertes en entreposage des légumes déshydratés à la température ambiante ont été élevées, sans doute à cause de l'action soutenue et destructive des enzymes sur la carotène.

Blanchiment à la vapeur

Le blanchiment à la vapeur (3 min.), bien que provoquant au début quelque perte de carotène par suite de dégradation à la chaleur, a sensiblement amélioré la rétention lors de la déshydratation et durant l'entreposage, dans tous les traitements déshydratants.

Sulfitage

L'effet principal du sulfitage a été d'améliorer la rétention de la carotène dans les légumes blanchis à la vapeur. Cette amélioration n'a cependant été significative que pour les espèces les plus sensibles au flétrissement, telles que l'amarante.

Déshydratation solaire

Toutes les espèces de feuilles, à l'exception de celles du manioc, ont montré de sérieuses différences dans le degré de rétention de la carotène, selon que les légumes étaient exposés à la lumière ou à l'obscurité. Les différences ont été surtout prononcées dans le traitement sans blanchiment et ont été sensiblement réduites par le blanchiment à la vapeur et le sulfitage. La photoprotection du manioc n'a pas sensiblement affecté la rétention de la carotène dans les légumes frais, blanchis à la vapeur et sulfités, ce qui indiquerait l'effet minime des mécanismes photodégradants.

Conclusions

Pour la rétention de la carotène et pour la qualité du produit déshydraté, les feuilles de manioc et de niébé ont répondu le plus favorablement à la déshydratation. Le chou frisé et l'amarante ont jauni et se sont flétris, même au séchage solaire dans l'obscurité, et leurs propriétés de rétention ont été affectées en conséquence.

Les méthodes traditionnelles de séchage des légumes feuillus, en Afrique, comportent le séchage direct au soleil et à l'ombre (Goode, 1973 ; McDowell, 1976). Les résultats de ces études font ressortir des pertes excessives de carotène par ces procédés et pendant l'entreposage subséquent des produits. Le blanchiment à la vapeur, bien qu'entraînant au début une certaine perte de carotène due à la dégradation du produit par la chaleur, a sensiblement amélioré la rétention à la déshydratation et en entreposage. Pour les espèces sensibles à la chaleur et au flétrissement telles que l'amarante, le sulfitage a un effet protecteur. Le séchage au soleil à l'abri de la lumière a permis une meilleure rétention de la carotène et amélioré la stabilité du produit conservé, l'emportant ainsi sur le séchage à la température ambiante ou avec exposition à la lumière. Toutefois, les espèces stables à la chaleur comme le niébé se déshydratent aussi bien lors du séchage à l'ombre que lors du séchage au soleil avec obscurcissement, pourvu que les feuilles aient été préalablement blanchies à la vapeur.

Les tests organoleptiques des feuilles de niébé déshydratées ont démontré les excellentes propriétés de réhydratation et la qualité comestible du produit. Compte tenu de leur degré de rétention des éléments nutritifs, de leur acceptation par les consommateurs et de leurs grandes possibilités d'utilisation, les feuilles de niébé offrent sans doute le meilleur potentiel de consommation comme légume déshydraté.

Rétention des éléments nutritifs chez la mangue et la papaye déshydratées au soleil

On a observé la rétention de la carotène et de l'acide ascorbique chez la mangue et la papaye deshydratées au soleil. Le degré de maturité parfaite et d'autre préparation, les traitements préalables et les variables du séchage ont été optimalisés dans les expériences préliminaires. La papaye et la mangue ont été découpées en tranches, respectivement de 0,5 à 0,75 cm et de 1 à 1,5 cm d'épaisseur. Le traitement préalable optimal pour la qualité (organoleptique) du produit a comporté un trempage à l'acide citrique (0,1 %) suivi d'un trempage au sucrose (10 %). On a observé l'effet obtenu sur la rétention des éléments nutritifs et sur la qualité en omettant le trempage à l'acide citrique ainsi que l'effet produit en combinant le blanchiment à la vapeur et le traitement chimique. Les produits avaient été déshydratés au soleil, avec obscurcissement, jusqu'à la teneur en humidité de 15 à 20 %.

Le tableau 3 reproduit les teneurs initiales en humidité (TH), en vitamine C et en carotène de la mangue et de la papaye. On a relevé pour la papaye une augmentation de l'acide ascorbique et de la carotène, à un degré de maturité répondant à des observations antérieures (Arriola et alii, 1975). C'est là une exception à ce que l'on a constaté, en règle générale, chez d'autres fruits dont les teneurs en acide ascorbique décroissent avec le mûrissement.

Cependant, la rétention d'acide ascorbique dans la papaye mûre a fluctué de 81 à 87 % et a été notablement plus élevée que dans le fruit très mûr, dans lequel elle n'a été que de 40 à 50 % (Tableau 4). Lorsqu'on a omis le trempage à l'acide citrique, on n'a relevé aucune différence significative pour la rétention de l'acide ascorbique et de la carotène après déshydratation.

Tableau 3. Composition des éléments nutritifs de la mangue et de la papaye.

Maturité	Humidité (%)	Vitamine C (mg/100 g)	Carotène β (µg/100 g)
Papaye			
très mûre	86,00	53,78	343,75
mûre[a]	87,50	43,48	312,50
pas assez mûre	86,75	37,57	250,00
mûre	86,40	45,56	552,00
Mangue			
mûre	77,75	31,64	800,00
mûre	81,75	41,13	1578,00
mûre	81,00	34,31	1288,75

a) Échantillons mûrs provenant de différentes fermes de la même région et, peut-être, de cultivars différents.

Tableau 4. Rétention des éléments nutritifs de la mangue et de la papaye séchées au soleil.

Maturité	Couleur	Consistance	Traitement	Rétention (%)[a]	
				Vitamine C	Carotène β
Papaye					
Mûre[b]	Orange	Ferme	Acide citrique et sucrose	81,27	50,62
Très mûre	Orange vif	Molle, se désagrège au découpage	Acide citrique et sucrose	48,50	49,76
Mûre	Orange	Ferme	Acide citrique et sucrose	90,63	50,74
Mûre	Orange	Ferme	Sucrose seulement	84,30	40,93
Mangue (Boribo)					
Mûre	Doré	Ferme	Acide citrique et sucrose	57,22	81,15
Très mûre	Orange	Molle, Spongieuse	Acide citrique et sucrose	38,61	85,40
Mûre	Doré	Ferme	Blanchiment à la vapeur, trempage citrique et sucrose	27,49	35,81

a) Base poids sec.

b) Échantillons mûrs provenant de différentes fermes de la même région et, peut-être, de cultivars différents.

Cependant, des différences organoleptiques et de couleur sont apparues après 2 semaines d'entreposage à la température du local.

Comparativement à la papaye, la mangue n'a conservé que 30 à 57 % de son acide ascorbique à la déshydratation, bien que la rétention de carotène ait été sensiblement plus élevée. Le degré de rétention de l'acide ascorbique en fonction de la maturité à été le même que pour la papaye, les fruits mûrs en conservant une proportion nettement plus élevée que les très mûrs. Comme pour la papaye, la rétention de carotène n'a pas semblé varier beaucoup avec la maturité.

On a noté des réductions significatives de l'acide ascorbique (19 %) et de la carotène (50 %) retenus après blanchiment à la vapeur, en même temps qu'une perte de saveur et de couleur. Cependant, la couleur du produit a paru plus stable durant l'entreposage, avec moins de tendance à devenir foncée.

Arriola, M.C., Madrid, M.C. et Rolz, C. 1975. Some physical and chemical changes in papaya during storage. Proceedings of the American Society of Horticultural Science, 19, 97.

Bhodal, M., Gibbs, N.E. et Simmons, W.K. 1969. Nutrition survey and campaign against malnutrition in Kenya. WHO FAO UNICEF, 170 p.

Burrows, J. 1975. Kenya: into the second decade. Maryland, USA, The John Hopkins University Press, pp. 447-526.

Goode, F.M. 1973. Some local vegetables and fruits of Uganda. Entebbe, Uganda, Department of Agriculture, 61 p.

Keller, W.E., Muskat, E. et Valder, E. 1969. Investigations into health and nutrition in East Africa. München, DFR, Weltforum Verlag, 253 p.

McDowell, J. 1976. Village technology in Eastern Africa. Nairobi, Kenya, Easte n Africa Regional Office, UNICEF, 32 p.

Steenberger, W. M., Kuscin, J.A. et Onchere, S.R. 1978. Tropical and Geographical Medicine, 30.

L'introduction du niébé dans l'alimentation du nord-est de la Thaïlande

T. Ngarmsak,[1] M.D. Earle[2] et A.M. Anderson[2]

Résumé Cet exposé décrit les efforts d'élaboration d'un système visant à introduire des préparations à base de niébé dans le régime alimentaire du nord-est de la Thaïlande. Le projet des « légumineuses préparées à la maison » de l'Université de Khon Kaen a réussi à confectionner des mets à base de niébé satisfaisants, riches en protéine et prévu un menu hebdomadaire d'un bon équilibre nutritif destiné aux villageois en combinant diverses préparations de cette légumineuse et des aliments de consommation courante dans ces régions. On a également préparé, à partir de farine de niébé, une forme de repas léger destiné aux magasins de produits alimentaires.

Au cours des dernières années, des scientifiques de l'université Massey, en Nouvelle-Zélande, ont élaboré un système visant à mettre au point diverses préparations alimentaires répondant à des besoins reconnus ou prévisibles de certains groupes humains. Les détails du système peuvent varier d'un projet à l'autre, mais ceux-ci sont généralement structurés en étapes successives qui font, chacune, l'objet d'une évaluation.

Ces étapes comportent d'abord une perception nette des objectifs poursuivis. Les idées proposées ensuite le seront en fonction de ces objectifs. Au sujet d'un produit, notamment, l'examen s'effectue en tenant compte des possibilités de commercialisation et de la faisabilité technique. L'étape suivante comporte une étude détaillée du marché et des transformations éventuelles à envisager pour les produits primaires. Une évaluation qualitative de ces derniers permet de choisir ceux qui conviennent le mieux. Vient ensuite l'élaboration de prototypes accompagnée de tests préliminaires. À ce stade, on peut déjà obtenir une appréciation économique plus précise du projet, avant d'aborder les étapes plus coûteuses de la production commerciale et de la mise en marché. Aux étapes suivantes, l'on étudiera les paramètres de la préparation, soit dans une installation-pilote ou à une échelle industrielle réduite, afin de déterminer si le produit envisagé peut être préparé aisément, économiquement et de façon continue en préservant ses normes de qualité. À ce stade, on est suffisamment renseigné pour entreprendre l'analyse détaillée du marché envisagé et établir un plan complet portant sur la présentation, l'épreuve du produit et les méthodes de marketing sous forme de test auprès du consommateur ou dans un marché donné. Si le produit franchit avec succès cette étape, il est prêt à être mis en marché.

Les produits préparés à base de niébé

Dans l'élaboration d'un produit alimentaire destiné aux régions nord-est de la Thaïlande, l'objectif principal était d'obtenir une bonne valeur nutritive et d'ouvrir un marché à une nouvelle matière première, le niébé. L'appréciation des étapes de cette élaboration est fondée sur la valeur nutritive des produits et sur l'accueil qui leur serait réservé par les villageois des régions impliquées. Le nord-est de la Thaïlande est l'une des régions les plus pauvres du pays, dans laquelle vit environ le tiers de la population : celle-ci doit compter avant tout sur l'agriculture pour sa subsistance, son revenu provenant principalement de la production du riz, du manioc, du kenaf, de la canne à sucre et de légumineuses.

Plusieurs études font ressortir (ICNND, 1962 ; Chandrapanond et alii, 1973 ; Kumazawa et alii, 1974) que, malgré une production agricole relativement abondante, la Thaïlande souffre de sous-alimentation, et c'est notamment le cas pour

1. Department of Agricultural Products, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand.
2. Department of Food Technology, Massey University, P.O. Box 63, Palmerston North, New Zealand.

une bonne partie de la population des régions semi-arides du nord-est.

Ngarmsak et alii (1980), étudiant les habitudes alimentaires des habitants de ces régions à l'Université de Khon Kaen ont constaté que le régime se composait surtout de riz glutineux avec un peu de chair animale, surtout de poissons d'eaux douces, et de quantités assez considérables de légumes. On y consomme également quelques légumineuses. Ces produits proviennent surtout de terres cultivées au voisinage des villages et varient d'après les saisons.

Les carences en protéines et en éléments énergétiques sont dues surtout à un manque d'aliments peu coûteux et de bonne qualité dans le régime des familles peu fortunées. On a suggéré les légumineuses comme une source avantageuse de protéine bon marché et d'excellente qualité. Le soja ne réussit pas bien dans le nord-est ; les fèves mungo, les arachides et les haricots sont cultivés depuis longtemps dans quelques villages, mais pas dans d'autres. Le projet de multiculture de l'Université de Khon Kaen a encouragé l'introduction du niébé comme légumineuse adaptée à cette partie du pays, parce qu'il pousse bien en régions semi-arides où d'autres légumineuses échouent. Si prometteuse qu'elle paraisse, son intégration dans la rotation des cultures, suscite une certaine méfiance chez les cultivateurs qui désirent, avant de l'adopter, s'assurer de sa valeur pour l'alimentation familiale ou comme récolte de rapport. Il importait donc d'encourager l'usage du niébé auprès des ménagères, des commerçants et magasins d'alimentation. Le projet des légumineuses préparées à la maison, de l'Université de Khon Kaen, a voulu stimuler l'emploi du niébé comme source protéique ainsi que la préparation de produits à base de cette légumineuse. Sa tâche comporte deux étapes.

1re étape : Amélioration du régime des villageois

L'utilisation du dolique a pour but d'améliorer la situation nutritionnelle dans les campagnes. Le plus souvent, en ajoutant aux aliments consommés un complément de niébé on pourrait leur assurer les éléments nutritifs indispensables à un coût modéré. L'adoption de cette légumineuse, soit comme complément de matières premières déjà disponibles, ou comme remplacement de ces dernières dans le régime courant, pourrait servir de base à un choix de menus à la fois nourrissants et bon marché. Il est essentiel que les mets apprêtés avec le niébé soient bien accueillis des villageois et adoptés par eux dans leur régime habituel. La première étape du travail d'élaboration a donc été la confection de mets à base de niébé et la planification d'un régime équilibré et enrichi par l'introduction de ce complément.

On a dressé une liste d'une cinquantaine de recettes comprenant des plats principaux, des collations et des desserts, en puisant à la documentation existante et dans des recettes locales, sans parler d'une certaine dose d'imagination. Des essais préliminaires de cuisson ont permis d'évaluer les occasions qui s'offraient d'ajouter du niébé à chaque mets. Des jurys de dégustateurs en ont évalué la saveur après quoi, on les a sélectionnés d'après leur contenu de protéines, leur prix unitaire, leur facilité de préparation et celle de se procurer sur place les éléments de base. La sélection a réduit à 14 le nombre des plats principaux et à 11 celui des collations et des desserts jugés les plus acceptables. Chacune des recettes a ensuite été révisée pour permettre d'augmenter la proportion de niébé, et soumise à des essais de dégustation individuels et par un jury pour obtenir un classement d'après la saveur et les préférences probables du consommateur. La recherche a été poussée aussi loin que possible en vue de porter au maximum le contenu protéique des formules en appliquant une programmation linéaire, et afin de calculer les teneurs de chacun des 26 éléments nutritifs de chaque mets. Après avoir ainsi maximalisé le contenu protéique, de nouveaux tests de consommation ont eu lieu, cette fois confiés à un jury de dégustateurs thaïlandais du nord-est. Les commentaires recueillis de cette source devaient ensuite permettre la sélection de recettes plus acceptables d'après les coûts paramétriques constatés dans la programmation linéaire, et en fonction des améliorations de la saveur jugées nécessaires. Les recettes définitives passées à l'ordinateur ont été retenues pour la planification des menus et diffusées sous forme de brochures distribuées par les organismes officiels et dans les écoles.

Les plats retenus ont alors été inclus dans un menu hebdomadaire composé d'après la programmation entière, à partir d'un mélange de mets consommés couramment dans le nord-est de la Thaïlande. Les plats au niébé ainsi que le menu en question sont actuellement présentés dans six villages, par diverses formes de propagande parmi lesquelles on espère découvrir les plus aptes à promouvoir ce nouveau produit alimentaire auprès de la population.

2e étape : Encouragements à la culture du niébé comme récolte de rapport

Pour convaincre les fermiers d'accroître la culture du niébé non seulement pour leur propre

usage mais comme récolte de rapport, ils doivent être assurés d'une utilisation sensiblement accrue de cette légumineuse. C'est sous forme de farine que celle-ci pourrait le plus facilement entrer dans la composition des menus, et surtout de collations puisqu'il s'agirait alors de plats prêts à être consommés, ce qui éviterait aux ménagères d'avoir à apprendre des recettes nouvelles. Sous cette forme, les préparations de niébé pourraient être vendues dans les magasins d'alimentation de toute la Thaïlande.

Le but recherché a donc été de développer l'utilisation du niébé à l'état de farine en vue de la préparation de collations. Les mets obtenus devraient être nutritifs, notamment sous le rapport de la protéine, peu coûteux, exiger peu de préparation ou de cuisson et, si possible, être prêts à consommer, faciles à transporter, se conservant sans réfrigération, d'une saveur agréable qui les ferait accepter aussi favorablement que des produits déjà connus, et pouvant compter sur une clientèle étendue.

Les étapes conduisant à la production de ce genre de mets sont les suivantes : recherche d'idées sur le produit à créer et sélection systématique des meilleures, tests des formules retenues et de leur préparation, tests auprès des consommateurs, présentation des collations préparées au commerce et à l'industrie alimentaires, et propagande en vue de leur consommation.

Dans la recherche des idées nouvelles, les formules incluant le niébé ont résulté d'explorations dans les livres de recettes thaïs. Les proportions de farine de niébé ont été mises au point d'après ces informations et par des essais de recettes. Les produits convenant le mieux ont été retenus après une sélection systématique, tout d'abord par la méthode de « accepté ou rejeté ». Le premier critère était le contenu élevé en farine de niébé. D'après l'expérience ainsi vécue et après discussions, on a estimé que la proportion optimale devait dépasser 12 %. Les idées premières d'abord élaborées ont été rectifiées en fonction de ces exigences.

Dans le choix des idées appropriées à développer, nous avons suivi la méthode de sélection par liste de contrôle, qui s'efforce de quantifier l'information de manière à permettre la comparaison des idées une par une et de retenir les plus haut cotées pour les approfondir ultérieurement. Les facteurs de sélection en rapport avec l'objectif (le type de collation) ont reçu un classement. Chacune des idées de produit était classée numériquement comparativement au total pour chaque facteur, après quoi les points de tous les facteurs étaient totalisés de façon à obtenir un score global pour l'idée en question. D'après le chiffre obtenu, on pouvait alors classer par ordre les diverses idées et retenir la plus prometteuse. C'est ainsi qu'on a abouti à adopter une sorte de beignet au niébé.

L'étape suivante consistait à trouver la meilleure méthode de préparation de ces beignets. Deux procédés ont été retenus : le soufflage en friture dans l'huile chaude, et une machine communale effectuant le conditionnement de la pâte et la friture à l'échelon du village. Les deux méthodes ont été jugées assez simples pour être confiées à un commerçant local de produits alimentaires. Le soufflage à l'huile chaude serait le procédé le plus facile à adopter. La pâte sèche, gélatinisée, ayant une teneur en humidité d'environ 10 % gonflera en friture profonde dans de l'huile chauffée entre 195 et 205 °C. Quant à la machine communale de conditionnement, elle a été mise au point par la « Meals for Millions Foundation » (MMF, 1977). Elle coûte peu, est de fabrication simple et de technique intermédiaire, et conçue spécialement pour la préparation de produits comestibles légers à l'échelon du village.

Une fois choisis les modes de préparation, l'étape suivante consistait à établir la formule à adopter et à mettre à l'essai le procédé. Cette tâche est actuellement en cours. On avait constaté d'abord que l'on pouvait obtenir un bon beignet soufflé à l'huile chaude, à partir d'une pâte gélatinisée, sèche, composée d'un mélange de tapioca et de farine de niébé, en proportions de 1 à 1. En augmentant la proportion de farine de niébé, on obtenait un beignet de volume réduit et plus compact. À présent, on envisage d'utiliser une préparation contenant le maximum de farine de niébé compatible avec l'obtention d'un produit final soufflé à point.

La machine communale de conditionnement a été fabriquée sur place d'après les instructions (MMF, 1977). On en a fait l'essai avec un mélange de farines de riz et de tapioca, répondant alors aux conditions d'emploi optimales de la machine telles que publiées dans la brochure éditée par la « Meals for Millions Foundation ». On a pu obtenir un produit satisfaisant, moyennement soufflé avec de la farine de niébé, contenant une proportion de 20 à 30 % d'humidité et dans des conditions optimales de cuisson se situant aux environs de 200 °C, à haute pression, pendant 15 à 20 sec. On a découvert également dans les premières expériences que la citrouille, le sésame et la farine de riz en mélange avec la farine de niébé pouvaient donner un produit soufflé apprécié. Des essais de préparations possibles combinant ces divers ingrédients (citrouille, sésame et farine de riz) permettront d'en ap-

préciser les effets sur la saveur et l'aspect du produit final. Une programmation linéaire permettra d'optimaliser la teneur et la qualité de protéines présentes dans les divers mélanges. Les produits soufflés ainsi préparés seront présentés à un jury de dégustateurs qui en appréciera l'acceptabilité. Ensuite, on choisira la préparation présentant les meilleures caractéristiques nutritives et la mieux acceptée des consommateurs.

L'étape suivante sera celle du test à la consommation. Un échantillonnage formé de ménagères des villages et villes de Khon Kaen recevra le produit et en fera l'essai en famille. Une semaine plus tard, on les interrogera pour connaître leurs réactions concernant la saveur, la consistance et la présentation, entendre leurs suggestions en vue d'améliorations éventuelles du produit, et se renseigner sur leur intention de l'utiliser à l'avenir et avec quelle fréquence. Ces tests auprès des consommateurs serviront à améliorer le produit et à en estimer les chances de commercialisation.

Le but poursuivi étant de propager l'utilisation de la farine de niébé, on devra encourager les vendeurs, transformateurs et industriels de produits alimentaires, à préparer et à offrir en vente ce nouveau mets léger. L'on devra présenter ce dernier ainsi que ses méthodes de préparation à un aussi grand nombre que possible de représentants de ces groupes, afin de le leur faire adopter.

Le plan de présentation reste à mettre au point et on projette d'en faire l'essai réduit et d'en analyser les résultats avant de le mettre à exécution sur une grande échelle. Deux séries de colloques auront lieu à l'Université de Khon Kaen. La première comprendra une démonstration de la préparation des nouveaux produits, montrant la machinerie à utiliser avec les informations relatives à la fabrication ou à l'achat des éléments nécessaires, et leurs prix. On indiquera également les frais d'exploitation et les profits réalisables de la fabrication et de la vente des collations. Les vendeurs, les petits transformateurs et entrepreneurs de produits alimentaires seront invités à faire l'essai, dans leurs locaux, de cette nouvelle fabrication. A cette fin, on leur fournira les ingrédients et la machinerie nécessaires et, simultanément, on effectuera un test de commercialisation du produit dans les villages de la région ou dans les endroits comptant un certain nombre de petits vendeurs ou transformateurs de comestibles susceptibles de s'intéresser au produit.

Un deuxième colloque aura lieu à l'intention du groupe formé de ces commerçants intéressés. On y exposera plus en détails les techniques de fabrication d'un bon produit et les soins à apporter à l'entretien de la machinerie. Les participants seront instruits également du contrôle de la production et de la qualité, de l'hygiène des procédés, de la comptabilité, de l'évaluation des prix de revient et d'autres questions administratives intéressant leur entreprise. Au début, l'université contribuera à la promotion des produits dans les régions où l'on tentera de les implanter.

Remerciements

Cette partie des travaux de recherche a été possible grâce à l'appui financier du CRDI et du gouvernement de la Thaïlande.

Chandrapanond, A., Suttapreyasri, D., Tansuphasiri, S. et Harinasuta, P. 1973. Nutrition, growth and development of Thai village children. Journal of the Medical Association of Thailand, 56(1), 722–731.

ICNND (Interdepartmental Committee on Nutrition for National Defence). 1962. Nutrition survey. Bangkok, Thailand, ICNND.

Kumazawa, A., Ono, M., Takahashi, H., Vchijima, Y. et Hiyano, T. 1974. Investigations on nutritional anemia of the farmers in the north eastern part of Thailand, November–December 1972. Thailand, Ministry of Public Health, Division of Nutrition, Department of Public Health Promotion and Japan, Nogoya Womens University.

MMF (Meals for Millions Foundation). 1977. The village texturiser: A low cost machine for preparing texturised food products at the village level. Meals for Millions Foundation, Mt. Rainier, VITA.

Ngarmsak, T., Anderson, A.M. et Earle, M.D. 1980. Menu planning for northeast Thailand. In: A symposium — food product and process development in Pacific countries. 10–13 November 1980, Auckland, New Zealand.

Adoption de la banane déshydratée comme aliment de sevrage à Costa Rica

Celsa Lastreto G., Rodney Cooke et Armando Campos S.[1]

Résumé Pour répondre à l'invitation lancée par le Programme pour les aliments et la nutrition de Costa Rica, on a mis au point une céréale de sevrage pour les bébés, à base de banane, de riz et de soja. Ce nouvel aliment, qui sera mis en vente dans les magasins, utilise avant tout des matières premières produites dans le pays. Il est sous forme de petits flocons et peut être délayé dans du lait ou de l'eau. Le produit a été fortifié par des vitamines et des minéraux et est prévu comme complément alimentaire au sevrage. Le procédé de préparation comporte une cuisson pour ramener les agents inhibiteurs du soja à un degré raisonnable, la gélatinisation de l'amidon du riz, l'inactivation des enzymes de la banane, et la déshydratation du mélange à 5 % de TH dans un séchoir à tambours.

Les études d'optimalisation des ingrédients utilisant le pointage chimique comme indice de nutrition, avec le contenu de banane maintenu à 40 %, ont indiqué que les mélanges comprenant 10,5 % et 16,5 % de matières sèches de soja constituaient le meilleur complément des protéines du riz et du soja. D'après des analyses chimiques et biologiques et le jugement de dégustateurs, la céréale pour bébés est restée stable après 12 mois d'entreposage dans un emballage en feuilles de papier, d'aluminium ou de polyéthylène. Le produit obtenu a été préparé à l'échelle commerciale. Il fournit beaucoup de calories et possède les caractéristiques fonctionnelles (viscosité, dispersabilité, absorption de l'eau) recommandables pour ce genre d'aliment. Son acceptabilité a fait l'objet d'une étude « L'alimentation des enfants de moins de deux ans » au premier stade des essais pratiques. Aux fins de cette évaluation, on a choisi un groupe de 50 familles ayant chacune un enfant de moins de 2 ans et demeurant dans un secteur urbain exposé à la sous-alimentation. D'après les renseignements fournis par la mère ou la personne chargée de nourrir l'enfant, les résultats ont démontré que le produit avait été bien accueilli.

Pour répondre au but énoncé dans le Programme pour les aliments et la nutrition du gouvernement de Costa Rica, de rechercher des produits d'alimentation nutritifs, peu coûteux et de distribution facile, bien acceptés du public, le Centre de recherche technique en alimentation (Centro de Investigaciones en Tecnología de Alimentos (CITA) a porté ses efforts sur la mise au point de produits répondant à ces exigences, notamment une céréale déshydratée, à saveur de banane, pouvant servir de complément alimentaire pour la période du sevrage et pouvant être préparée à l'eau ou au lait. Dans la préparation du produit n'entrent que des matières premières locales, soit de la banane pour tirer parti de l'excédent de récolte non exportable de Costa Rica, du riz cultivé dans le pays, et du soja entier pour améliorer la valeur protéique de la préparation, fournir l'huile nécessaire à la fabrication et apporter un supplément de calories. Ont été étudiées également les possibilités d'utilisation d'autres légumineuses (niébé et pois d'Angola) à la place du soja. Dans ce cas, le produit devait fournir un complément de lysine des aminoacides, de tryptophane et de thréonine dont les céréales sont déficientes, et de méthionine dont les légumineuses et les oléagineux ne contiennent souvent que de faibles quantités (Rosenberg et Culik, 1957 ; Bressani et alii, 1972a, b). Le projet a étudié l'effet obtenu sur la valeur nutritive et les caractéristiques fonctionnelles du produit en variant les proportions de soja, le contenu en banane constant à 40 % assurant au produit sa saveur distinctive. La formule définitive, enrichie d'huile de soja pour en améliorer la teneur calorique et fortifiée de vitamines et de minéraux, a été préparée à l'échelle commerciale et a donné une céréale possédant les caractéristiques fonctionnelles recommandées. L'acceptabilité du produit a fait l'objet d'un projet intitulé « Ali-

1. Centro de Investigaciones en Tecnología de Alimentos (CITA), Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica.

ments pour bébés de moins de 2 ans », ayant pour but l'obtention d'aliments contenant beaucoup de calories destinés aux enfants en bas âge au sevrage, élevés dans des milieux affectés par la sous-alimentation. Les objectifs spécifiques peuvent être énumérés comme suit :

(1) Apprécier l'acceptabilité et l'effet sur la nutrition de différents produits comestibles pouvant remédier efficacement à la malnutrition dont souffrent certaines populations rurales et urbaines.

(2) Confirmer les hypothèses déjà envisagées concernant les principaux facteurs et rapports susceptibles d'affecter les résultats, lorsqu'on présente des nouveaux produits alimentaires à l'échelon non commercial, à des familles résidant dans ces endroits.

(3) Consolider une méthode de recherche appropriée au contexte social de Costa Rica et à d'autres qui lui sont proches, pouvant servir de base à des études plus poussées dans ce domaine.

L'acceptabilité du produit a été évaluée à l'aide d'un test préliminaire, sur place, dans lequel on a distribué trois formes du produit : une céréale déshydratée pour bébés à saveur de banane ; une céréale à base de riz ; et une céréale à base de riz et de fève. Chacune a été mise à l'essai parmi un groupe de 50 familles, pendant deux mois. Un autre groupe témoin de 50 familles participait également aux essais, soit un total de 200 personnes. Chaque famille comptait au moins un enfant de moins de deux ans en voie d'être sevré ou venant de l'être.

Méthode de préparation

Essentiellement, la méthode de préparation comportait la cuisson préalable des ingrédients de la céréale et le séchage de la bouillie ainsi obtenue dans un séchoir à tambours. Après lavage à l'eau courante, les fèves de soja ont été mises à cuire pendant 39 min. à 121 °C ; on a ensuite vidé l'eau de cuisson pour enlever les hydrates de carbone solubles, cause principale de flatulence (Rackis et alii, 1970). La cuisson du soja permet de réduire la concentration des inhibiteurs et des oligo-saccharides qui provoquent la flatulence (Shemer et alii, 1973 ; Rackis et alii, 1974). On a ajouté ensuite l'eau et le riz qu'on a laissé bouillir 5 min. afin de gélatiniser l'amidon. À ce stade, les bananes épluchées ont été placées dans une cuve d'eau avec 0.1 % en poids d'acide ascorbique, pour éviter la décoloration du produit. Après quoi, on a ajouté le contenu de cette cuve au soja et au riz dans le cuiseur, et on a laissé bouillir le mélange durant 3 min. pour supprimer l'action des enzymes de la banane.

La préparation cuite était ensuite transvasée dans un réservoir alimentant un moulin Fitz, d'où elle passait dans un autre réservoir qui, à son tour, alimentait le séchoir à tambours. Dans ce dernier réservoir, la température était maintenue à 70 °C pour réduire la viscosité de la préparation, diminuer le coût du séchage et assurer que la pellicule formée dans le séchoir reste uniforme. Ce degré de chauffage prévient également le développement des microorganismes (Jay, 1973 ; Frazier, 1978).

La pression et la vitesse auxquelles le séchoir opérait ont été déterminées d'après un débit spécifique en grammes par heure et d'après les caractéristiques fonctionnelles du produit final (Fig. 1).

Résultats

Aspects nutritifs

Pour optimaliser les proportions relatives des ingrédients : banane-riz-soja du mélange on a eu recours à un pointage chimique pris comme indice nutritif. Ce pointage chimique a été effectué par une série d'équations linéaires, le contenu en banane restant constant à 40 %, et la teneur protéique fluctuant entre 8 et 18 %. Pour chacun des mélanges, on a relevé le pointage chimique et le contenu en calories. Ce pointage s'est effectué suivant les normes de 1976 de l'Organisation pour l'alimentation et la santé (OAS) des Nations Unies, et d'après celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) de 1973 en ce qui concerne les aminoacides. Les résultats obtenus ont indiqué comme proportion optimale de 10 à 12 % de protéine. En d'autres termes on a constaté que les meilleures préparations étaient celles contenant de 10,5 à 16,5 % de soja. Le contenu calorique a été pratiquement le même pour toutes (Tableau 1).

Les mélanges contenant 30 et 40 % de soja ont été expédiés à l'Instituto de Nutriciôn de Centro América y Panamá (INCAP) et à l'Institut des produits tropicaux (TPI) pour les analyses biologiques suivantes : indice d'utilisation de la protéine (IUP), utilisation nette de la protéine (UNP) et rapport protéique net (RPN). Les résultats ont indiqué que la qualité de la protéine des préparations atteignait 63 à 77 % de celle de la caséine, c'est-à-dire qu'elle était bonne mais non excellente. La raison en est que même si le mélange de riz et soja contient une bonne variété d'aminoacides, l'addition de banane réduit la qualité de la protéine à cause, peut-être, d'une décoloration d'origine non enzymatique du type Maillard, durant le processus de séchage.

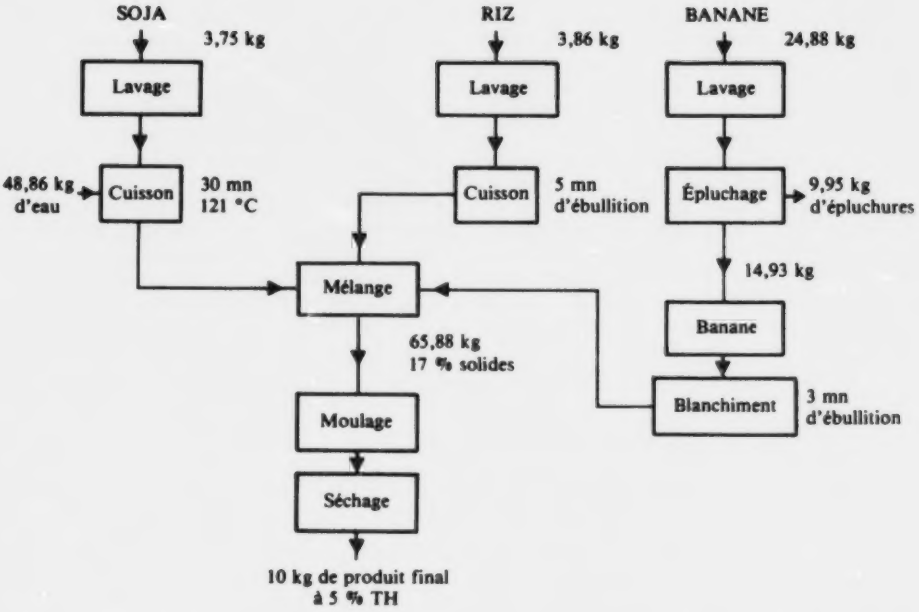

Fig. 1. Équilibre des ingrédients d'une préparation contenant 40 % de banane mûre (70 % TH), 30 % de riz (13 % TH) et 30 % de soja entier (10,4 % TH).

Caractéristiques fonctionnelles

Pour l'appréciation des caractéristiques fonctionnelles des préparations étudiées, on a eu recours aux méthodes et tests analytiques en usage dans l'industrie des aliments pour bébés pour le contrôle de la qualité, d'après les informations transmises par Productos Gerber de Centro América, S.A.

Les diverses préparations contenant différents pourcentages de soja et produites à l'échelle industrielle dans des conditions de séchage différentes ont été cotées d'après les caractères suivants : densité, solubilité, absorption de l'eau, consistance, tendance à former des grumeaux, et viscosité. Il ressort des résultats obtenus que les ingrédients du mélange ont une plus grande influence sur le produit final et, en particulier sur sa qualité, que les conditions de séchage. A mesure qu'on a augmenté le contenu de riz, la cote de l'absorption d'eau a été en diminuant. Tous les mélanges, préparés à l'échelle industrielle ou en moindres quantités, possédaient les propriétés requises d'un produit de ce genre (Tableau 2) et ils étaient comparables aux céréales pour bébés de Productos Gerber de Centro América, S.A.

Appréciation sensorielle du produit et conservation

La composition des préparations R_{40}, G_{40} et S_{40} s'établit comme suit : R_{40} = 40 % dolique, 20 % riz et 40 % banane ; G_{40} = 40 % pois d'Angola, 20 % riz et 40 % banane ; S_{40} = 40 % soja, 20 % riz et 40 % banane. Comme première étape, on a étudié l'acceptabilité et les qualités de conservation des trois préparations.

Des échantillons ont été conservés durant 12 semaines dans trois emballages commerciaux différents. Des analyses chimiques et microbiologiques, ainsi que des appréciations sensorielles ont eu lieu avant et après la mise en entreposage.

Différences entre les préparations

Les préparations ont différé sensiblement pour la couleur, l'odeur, la consistance et la saveur (test Tukey). Les résultats se sont avérés meilleurs pour le mélange au soja (S_{40}) que pour les mélanges au niébé et aux pois d'Angola (R_{40} et G_{40}) pour ce qui est de la couleur et de l'odeur. Pour la consistance, les résultats ont donné l'avantage au mélange R_{40} dont le produit final plus croustillant s'est mieux classé.

Tableau 1. Caractéristiques de différentes préparations de soja-riz-40 % banane (S).

Préparation	% base sèche		% protéine	kcal/ 100 g	Pointage chimique	Aminoacide limitatif
S_5	Soja Riz	5 55	8	390	82	Lysine
$S_{7,5}$	Soja Riz	7,5 52,5	9	391	86	Lysine
$S_{10,5}$	Soja Riz	10,5 49,5	10	392	90	Lysine
$S_{13,5}$	Soja Riz	13,5 46,5	11	393	92	Contenant du soufre
$S_{16,5}$	Soja Riz	16,5 43,5	12	393	90	Contenant du soufre
S_{22}	Soja Riz	22 38	14	395	86	Contenant du soufre
S_{25}	Soja Riz	25 35	15	395	85	Contenant du soufre
S_{30}	Soja Riz	30 30	17	396	84	Contenant du soufre
S_{40}	Soja Riz	40 20	20	399	81	Contenant du soufre

Différences dans les emballages et les périodes de conservation

Pour aucune des préparations les caractères sensoriels analysés n'ont révélé de différences significatives attribuables à l'emballage, ce qui confirme le fait que les trois types d'empaquetages utilisés possédaient des caractéristiques identiques. Au cours des périodes d'entreposage, on n'a pas remarqué de différences de saveur, de couleur ou de consistance ; la seule qu'on ait notée concernait l'odeur qui tend à se détériorer quelque peu après 6 semaines tout en restant cependant acceptable. Durant les 12 semaines de conservation, la teneur en humidité est demeurée stable dans toutes les préparations et avec les trois types d'emballages mis à l'essai. Les analyses subséquentes n'ont relevé aucun problème dû aux attaques de moisissures, de bacilles coliformes ou autres.

Des lots de la préparation S_{30}, après un an de conservation, ont subi des analyses microbiologiques et de leur teneur en humidité. La comparaison des résultats avec ceux des analyses faites 24 heures après la préparation du produit a confirmé sa bonne qualité microbiologique, aucune différence significative n'étant apparue dans le nombre des microorganismes pas plus que dans la teneur en humidité. Au cours de cette même période, aucun changement n'a été noté dans le contenu humide pour aucune des formes d'emballages.

Production à l'échelle industrielle

La préparation du produit à l'échelle industrielle a été effectuée dans les installations de la Productos Gerber de Centro América à Costa Rica. Il a été fortifié de vitamines et de minéraux et enrichi avec 10 % d'huile de soja pour accroître sa valeur calorique.

Le procédé de fabrication industrielle est semi-continu. On commence par mélanger la pulpe de banane avec la farine de riz et de soja auxquelles on ajoute ensuite les autres ingrédients avec de l'eau, pour obtenir un mélange dont la teneur totale en éléments solides est d'environ 17 % (Fig. 2).

À la sortie du séchoir à tambours, le produit a la forme de petits flocons à saveur et odeur de banane et dont la composition chimique est la suivante : humidité 4,90 %, protéine 10,20 %, matières grasses 13,85 %, cendre 3,3 %, hydrates de carbone 67,5 %, cellulose 0,70 %, sucres réducteurs 9,40 %, teneur calorique 463 kcal/ 100 g, (sec), thiamine 1,58 mg/ 100 g, riboflavine 1,90 mg/ 100 g, niacine 14,08 mg/ 100 g, calcium 634 mg/ 100 g, phosphore 528 mg/ 100 g, et fer 15-25 mg/ 100 g. Le produit obtenu répond aux normes de Gerber concernant les caractéristiques fonctionnelles et les analyses microbiologiques. Il a été empaqueté dans des sacs en feuilles de polyéthylène et d'aluminium contenant 265 g, et ensuite distribué dans les foyers participant à l'en-

Tableau 2. Caractéristiques fonctionnelles des mélanges S_{30}, S_{22}, $S_{16,5}$ et $S_{10,5}$ (S = soja riz banane) préparés dans sept conditions différentes de séchage.

Préparations	Conditions de séchage (lb/po.ca.)	Conditions de séchage (tr/min.)	Densité (g/cm³)	Solubilité (%)	Degré d'absorptivité de l'eau[a]	Consistance (I)	Tendance à former des grumeaux (II)	Viscosité (cP)[a]	Qualité d'après (I) et (II)[b]
S_{30}	50	2,25	0,19	27,0	1	Déliée	Aucune	1280	1 1
	80	2,25	0,17	31,0	1	Déliée	Aucune	1360	1 1
	80	3,25	0,19	33,0	1	Déliée	Aucune	1280	1 1
	80	4,50	0,21	37,0	1	Déliée	Aucune	1280	1 1
	100	3,25	0,16	33,0	1	Déliée	Aucune	1360	1 1
	100	4,50	0,20	32,0	1	Déliée	Aucune	1200	1 1
	100	5,50	0,19	39,0	1	Déliée	Aucune	1120	1 1
S_{22}	50	2,25	0,21	27,4	1	Déliée	Modérée	910	1 3
	80	2,25	0,19	35,6	1	Déliée	Modérée	770	1 3
	80	3,25	0,22	24,5	2	Déliée	Modérée	915	1 3
	80	4,50	0,15	27,4	3	Déliée	Légère	1840	1 2
	100	3,25	0,14	31,6	2	Déliée	Aucune	1255	1 1
	100	4,50	0,20	36,0	2	Déliée	Légère	1130	1 2
	100	5,50	0,15	33,5	1	Déliée	Légère	940	1 2
$S_{16,5}$	50	2,25	0,18	34,6	3	Déliée	Modérée	1180	1 1
	80	2,25	0,24	47,8	2	Déliée	Modérée	1010	1 1
	80	3,25	0,23	38,9	2	Déliée	Aucune	1280	1 1
	80	4,50	0,23	37,2	2	Déliée	Légère	880	1 2
	100	3,25	0,18	34,3	3	Déliée	Aucune	1450	1 1
	100	4,50	0,16	33,7	3	Déliée	Aucune	1215	1 1
	100	5,50	0,11	33,4	2	Déliée	Aucune	1170	1 1
$S_{10,5}$	50	2,25	0,18	38,3	3	Déliée	Aucune	1354	1 1
	80	2,25	0,12	36,3	3	Déliée	Légère	1600	1 2
	80	3,25	0,18	38,6	3	Déliée	Aucune	1794	1 1
	80	4,50	0,17	37,8	3	Déliée	Aucune	Pas de relevé (plus de 100)	1 1
	100	3,25	0,16	36,3	3	Déliée	Aucune	1700	1 1
	100	4,50	0,17	43,7	3	Déliée	Aucune	1450	1 1
	100	5,50	0,12	32,8	3	Déliée	Aucune	1440	1 1

a) Viscosité déterminée à l'aide de l'aiguille no 4 de Brookfield, utilisant la quantité d'eau correspondante à la cote d'absorptivité d'eau de la préparation en question.
b) Valeur qualitative d'après l'échelle établie pour les préparations d'aliments pour bébés : les degrés 1 et 2 sont bons, 3 doit être rapporté et 4 doit être rejeté.

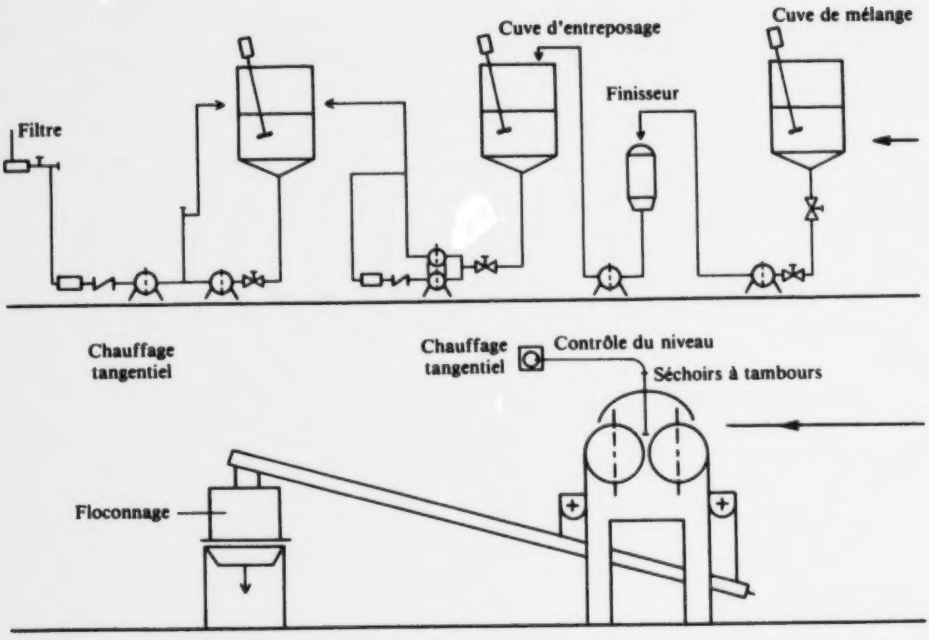

Fig. 2. Chaîne de fabrication pour la préparation à l'échelle industrielle.

quête sur l'acceptabilité et l'effet nutritif de la céréale.

Acceptabilité du produit

L'acceptabilité du produit a été évaluée durant le test pratique préliminaire mentionné plus haut. La première étape de cette étude comportait le recrutement de 200 familles domiciliées dans quatre régions urbaines déclarées zones exposées à la malnutrition par le Service d'information sur la nutrition de Costa Rica. Chacune de ces familles devait compter au moins un enfant de moins de 2 ans déjà sevré ou en voie de l'être, et formait ainsi une unité analytique du thème central. Les familles ont été divisées en groupes de 50 chacun, auxquels les aliments ont été distribués de la façon suivante : groupe 1 — céréale déshydratée à saveur de banane ; groupe 2 — céréale au riz ; groupe 3 — riz et fèves ; et groupe 4 — témoin ne recevant aucun produit.

Des relevés constants ont permis de suivre la distribution et la consommation des céréales à la banane et au riz en vue, essentiellement, d'en constater l'acceptabilité et l'effet sur la nutrition. Les familles du groupe 3 ont reçu la préparation de riz et de fèves afin de vérifier une autre hypothèse, c'est-à-dire qu'en augmentant la somme d'aliments dont disposeraient les adultes d'un groupe de familles, la nutrition des enfants en bénéficierait de façon positive. Dans les quatre groupes, on a observé de près les quantités d'aliments consommés, l'état de santé et la situation socioéconomique de chaque famille. Au point de vue nutritif l'effet de l'aliment a été vérifié par des procédés anthropométriques, tandis que des observateurs compétents interrogeaient les mères ou les personnes chargées de nourrir les bébés pour établir l'acceptabilité.

Sur ce dernier point, les informations ont porté sur un ensemble de variables : connaissances et préjugés à propos des aliments pour bébés, type de régime de l'enfant, disponibilité effective des aliments, etc. On a voulu également constater si l'instruction donnée aux quatre groupes sur les principes élémentaires de la nutrition avait quelque effet sur ces variables. Les facteurs d'acceptabilité des aliments pour bébés ont été classés en cinq groupes : caractères organoleptiques, réactions de l'enfant en absorbant l'aliment, ingestion, résultats obtenus dans la préparation de la céréale, et évaluation des propriétés nutritives et digestives du produit offert.

La vérification de ces facteurs a eu lieu deux fois : au début et, ensuite, à la fin de la période

d'utilisation de l'aliment. On a pu relever ainsi les changements intervenus et vérifier la constance des informations recueillies. La période du test a duré 8 semaines.

Résultats

Organoleptiques

Chaque mère a goûté le produit et s'est ensuite prononcée sur sa saveur, sa couleur et son odeur. Entre 70 et 90 % des mères l'ont déclaré bon ou très bon, à l'échelle hédonistique de tous les facteurs.

Préparation de la céréale

Chaque mère a donné son opinion personnelle de la consistance du produit préparé. A la première consultation, l'on a constaté que 60 % des mères l'avaient trouvé lisse, et 5 % grumeleux. A la deuxième consultation, 8 semaines plus tard, 80 % ont été d'accord sur la consistance lisse de la préparation.

Appréciation des qualités digestives et nutritives

Les mères ont été invitées à donner leur appréciation de la valeur nutritive du produit et de sa digestibilité par le bébé. Plus de 90 %, dans les deux entrevues, ont décrit la valeur nutritive comme bonne ou très bonne, le même jugement s'appliquant à sa digestibilité (Tableau 3).

Le produit a pu ainsi mériter des notes assez élevées, confirmant les analyses sensorielles effectuées en laboratoire. L'opinion maternelle a paru plus précise dans la deuxième consultation ; c'est pourquoi il a semblé plus logique de lui accorder une fiabilité supérieure à celle de la première. Ces informations ne vont pas à l'encontre de celles obtenues de la consommation. L'acceptabilité de la céréale au riz s'est également révélée élevée, mais les données s'y rapportant n'ont pas été incluses dans ce rapport, les différences d'une localité à l'autre n'ayant pu être entièrement éliminées (du fait que l'étude était menée dans des conditions non artificielles), et on ne saurait considérer les informations comme strictement comparables.

Tableau 3. Réaction des enfants au moment du repas, et quantité du produit consommée.

	Premier traitement		Deuxième traitement	
Réaction				
Beaucoup apprécié	52,5	75,0	40,5	78,6
Moyennement apprécié	22,5		38,1	
Assez peu apprécié	12,5		19,0	
Très peu apprécié	5,0		—	
Incertains	—		2,4	
Données manquantes	7,5		—	
Portion consommée				
Entière	65,0	72,5	69,0	78,5
Presque entière	7,5		9,5	
Environ la moitié	5,0		4,8	
Moins que la moitié	2,5		4,8	
À peine touché	12,5		7,1	
Données manquantes	7,5		—	

Bressani, R. et alii. 1972a. Improvement of protein quality by amino acid and protein supplementation. Oxford, U.K., Pergamon Press, pp. 475-539.

1972b. The nutritional value of rice in comparison with that of other cereals in the human diet in Latin America. Reprinted from : Rice Policy in Latin America. Cali, Colombia, CIAT, 19 p.

Frazier, W.C. 1978. Food microbiology (3rd ed.). New York, USA, McGraw Hill, 540 p.

Jay, J.M. 1973. Modern food microbiology. Zaragoza, Acribia, 319 p.

Rackis, J.J. et alii. 1970. Flavor and flatulence in soybean protein products. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 18(6), 977-982.

1974. Biological and physiological factors in soybeans. Journal of the American Oil Chemist's Society, 51, 161A-174A.

Rosenberg, H.R. et Culik, R. 1957. The improvement of the protein quality of white rice by lysine supplementation. Journal of Nutrition, 63, 477-487.

Shemer, M., Wei, L.S. et Perkins, E.G. 1973. Nutritional and chemical studies of three processed soybean foods. Journal of Food Science, 38, 112-115.

Commercialisation du poisson séché dans l'est de Java (Indonésie)

J.A. Sumardi, H. Purnomo, W.H. Susanto, Putiati, Darius et I. Suryo[1]

Résumé Une enquête a été menée dans un village effectuant la préparation du poisson à l'échelle rurale, ainsi que dans un marché urbain, afin de relever les grandes caractéristiques de la commercialisation du poisson séché dans l'est de Java. Marchands et consommateurs ont été interviewés. On a constaté que les uns et les autres préféraient le poisson éviscéré et séché, peu salé, bien que cette préférence varie avec les espèces. Cependant, les marchands se préoccupent de la durée de conservation du poisson séché offert actuellement et critiquent la longueur de la filière commerciale. Les renseignements qui suivent devraient orienter la mise au point de techniques améliorées de préparation et de séchage, applicables dans les villages de pêcheurs, et répondant à la demande de produits moins salés compatibles avec une durée satisfaisante de conservation.

En 1979, 53 % de la production totale des pêcheries provenaient de l'est de Java. Plus de la moitié était conservée par séchage (33 856 t). Cette opération n'étant pas normalisée, la qualité des produits obtenus varie considérablement. La consommation du poisson préparé diffère beaucoup, elle aussi, d'une région à l'autre et entre les catégories socioéconomiques riches et pauvres. Dans une large mesure, c'est le genre de poisson offert sur les marchés ainsi que la facilité de se le procurer qui déterminent la consommation. A partir de ces réalités, nous avons entrepris d'étudier les marchés de l'est de Java pour préciser, entre autres, les préférences et les idées des commerçants et des consommateurs. Nous estimions que ce genre d'information pourrait servir de point de départ utile pour planifier l'amélioration des procédés de préparation du poisson.

Matériels et méthodes

Nous avons interrogé 34 marchands à leur étal de poisson séché, dans la municipalité de Malang (région consommatrice) et dans le district de Muncar (région productrice). Dans chacune, nous avons interviewé également 24 consommateurs. Muncar ne possède qu'un marché, tandis que Malang compte un grand marché (Pasar Besar) et d'autres de moindre importance dans les secteurs avoisinants (Tableau 1). Aux marchands, on a demandé quelles étaient les préférences des consommateurs, et pourquoi, ainsi que des détails sur la qualité et la durée de conservation du poisson séché, les restrictions au commerce, et leurs suggestions en vue d'améliorer la qualité des produits. Les consommateurs ont été questionnés sur la fréquence avec laquelle ils consommaient le poisson séché, son mode de préparation et de présentation, leurs espèces préférées et pourquoi, le temps pendant lequel ils gardaient le poisson avant de le consommer et sa durée maximale de conservation. Aux étaux, nous nous sommes procuré des échantillons de poisson séché et la teneur en sel en a été calculée par le procédé Volhard au laboratoire Unibraw/CRDI. Les rapprochements appropriés ont été effectués avec les commentaires des marchands sur le degré de salage des produits vendus par eux.

Résultats et discussion

Les résultats recueillis par nous font ressortir de nettes différences entre la région productrice et la région consommatrice. Sans doute, reflétaient-elles la disponibilité du poisson frais et les habitudes alimentaires de chacune.

1. Departemen Pendidikan Dan Kebudayaan, Universitas Brawijaya, Proyek Kerjasam Unibraw/IDRC, Jalan Mayjen Haryono 169, Malang, Jatim, Indonesia.

Dans la région de Muncar (productrice) presque tout le poisson séché, aux éventaires du marché, provenait de petits transformateurs utilisant des méthodes et un matériel fort simples (Fig. 1). Parfois, le propriétaire de l'étal était en même temps le transformateur. Il existe également d'autres transformateurs, grands et moyens, mais qui vendent aussi leurs produits aux commerçants des grandes villes de Java (Fig. 2).

Tous les marchands de Muncar vendent leur poisson non salé ou légèrement salé parce que, dans cet état, il se conserve mieux que le produit fortement salé. Les consommateurs locaux préfèrent les petites espèces comme les *teri* (esp. *Stolephorus*), *lemuru* (esp. *Clupea*), *tembang* (esp. *Sardinella*), et *cumi-cumi* (esp. *Loligo*), à cause de leur bon marché. D'après les marchands, les consommateurs distinguent les poissons légèrement salés d'après leur aspect. Leur chair, en effet, est ferme et leur couleur semblable à celle du poisson frais ; ils sont plus tendres que le poisson fortement salé et restent plus stables par tous les temps. Le poisson fortement salé est dur, blanchâtre et insipide, et son état se modifie d'après le temps. Les marchands estiment que la forte teneur en sel provoque l'absorption de l'eau par le poisson.

Pour éviter ces pertes dues au temps, les marchands rapportent qu'ils font sécher le poisson au soleil et le conservent ensuite dans de vastes contenants bien aérés. Les pièces trop grosses pour subir ce traitement sont suspendues en avant de l'étal et y restent jusqu'à ce qu'elles trouvent acheteur, la durée variant selon les espèces, le salage et la préparation. En règle générale, le *tongkol* (esp. *Euthynnus*) se vend dans les 2 à 4 semaines, tandis que le délai peut atteindre plus de 2 mois pour le *teri*.

Tableau 1. Nombre de marchands, endroits et noms des marchés étudiés.

Endroit et nom du marché	Total des étaux	Marchands interviewés
Malang		
Blimbing	8	4
Sarangan	6	3
Klojen	4	2
Pasar Besar[a]	16	8
Oro-2 Dowo	8	4
Dinoyo	9	4
Tanjung	4	2
Sukun	6	3
Muncar		
Tembokrejo	7	4

a) Pasar Besar signifie marché en gros, les marchands revendant le poisson aux détaillants. Les marchands, ici, achètent leur poisson directement des producteurs ou d'autres gros commerçants ; 4 (dont 2 ont été interviewés) achètent de 2 à 25 t par semaine et 12 (6 interviewés) de 100 à 300 kg par semaine. D'autres marchands de Malang ont de plus petits commerces et écoulent de 5 à 10 kg de chaque variété, tous les 3 à 7 jours.

Fig. 1. Étal typique de poisson séché au village de pêcheurs de Muncar (est de Java).

La quantité journalière de poisson séché vendue à Muncar varie d'un minimum de 2 kg à un maximum de 30 kg, les seuls acheteurs étant les habitants de l'endroit. Les ventes régressent nettement à la saison du poisson frais et les prix diffèrent sensiblement d'après les espèces. Toutes ces différences ont été retenues au cours de notre enquête (Tableau 2).

Les marchands ignorent la quantité de sel de leurs produits. Notre analyse a révélé que ces derniers en contenaient tous, bien que les vendeurs fassent la distinction entre poissons non salés, demi-salés et fermentés (Tableau 3).

Tableau 2. Prix des différentes espèces de poissons séchés vendus à un petit étal de Muncar, au cours de l'enquête.

Espèces	Prix (NRPH/kg)[a]	
	Minimum	Maximum
Salage léger		
Petite sardine (esp. *Clupea*)	150	250
Cumi-2	650	2000
Teri	400	650
Pari (esp. *Dasciatis*)	300	350
Salage fort		
Sardine lemuru	125	150
Cumi-cumi	550	1750
Teri	300	600
Bawal	250	400
Tongkol	300	600
Petite sardine/semenit (esp. *Clupea*)	75	250

a) 630 NRPH = 1 $US.

En contraste avec la région productrice, Malang, région de consommation, possède plusieurs marchés. La commercialisation du poisson rayonne du Pasar Besar, vaste marché où les marchands sont surtout des grossistes qui reçoivent leurs produits de l'extérieur et les revendent aux détaillants des marchés secondaires, nommés d'après leur endroit de résidence. Le nombre de ces marchands varie pour chaque marché et dépend des activités principales de ce dernier. Pour la plus grande partie, le poisson séché vendu à Malang provient des régions productrices de l'est de Java, bien qu'il en arrive aussi de Sumatra et de Kalimantan (Tableau 4).

Les poissons préparés tels que le *kurisi* (esp. *Holocentrum*) et janggalak (esp. *Saurida*), soit non salés ou légèrement salés, semblent être les préférés des consommateurs, selon les détaillants. Ces derniers ont observé que le poisson le plus recherché était celui possédant une bonne saveur et une texture satisfaisante, bien présenté, pas trop salé, ayant été bien séché après éviscération et pouvant se conserver pendant un temps raisonnable. Les mêmes détaillants ont aussi ajouté que les petites espèces comme les anchois (esp. *Stolephorus*) et les petites sardines (esp. *Clupea*) étaient également recherchées, surtout parce que peu coûteuses.

Parmi les 98 consommateurs interrogés, 44

Fig. 2. Étaux de poisson séché (sous-agents) dans un grand marché urbain, à Malang (est de Java).

Tableau 3. Teneurs en sel et en humidité du poisson séché à Muncar.

Espèces	Traitement	Classement	Sel (%)	Humidité (%)
Semenit	Poisson entier	Non salé	22,34	44,56
Kurisi	Éviscéré	Demi-salé	29,02	51,15
Tembang	Entier	Salé	30,89	48,04
Selar	Entier	Salé	32,91	45,85
Layang	Entier	Fermenté	37,29	49,55
Selar	Entier	Fermenté	37,59	48,78
Kurisi[a]	Entier	Salé	29,02	51,15
Kurisi	Éviscéré	Salé	31,67	48,57

a) Esp. *Holocentrum*.

Tableau 4. La variété des poissons préparés vendus à Malang et leur origine.

Espèces	Traitement	Origine des produits
Lemuru/sardine (esp. *Clupea*)	Salé séché	Muncar
Tembang (esp. *Sardinella*)	Salé séché	Muncar
Layang (esp. *Decapterus*)	Salé séché	Muncar, Tuban, Brondong
Teri (esp. *Stolephorus*)	Non salé séché/mi-salé	Muncar, Madura, Sumatera
Kurisi (esp. *Holocentrum*)	Salé séché	Gresik, Madura
Gulamah (esp. *Otolithoides*)	Non salé séché/mi-salé séché	Pasuruan, Probolinggo
Janggalak (esp. *Saurida*)	Non salé séché/mi-salé séché	Pasuruan, Probolinggo, Madura
Kerong-2 (esp. *Therapon*)	Salé séché	Madura
Banyar (esp. *Rastrelliger*)	Fermenté séché	Madura, Tuban
Selar (esp. *Caranx*)	Salé séché	Kalimantan, Madura
Bang-2 an (esp. *Lutjanus*)	Mi-salé séché	Pasuruan, Probolinggo, Madura

(45 %) préféraient le *kurisi* et le *janggalak*. Les autres ont déclaré aimer toutes les espèces pourvu qu'elles ne fussent pas trop salées et aient assez bien conservé leur aspect de fraîcheur, qu'elles aient été vidées (sauf les petits poissons) et convenablement séchées.

Les manipulations par les marchands dépendent de l'origine, des espèces, de la grosseur et du degré de salage des poissons. De façon générale, l'approvisionnement provient de Madura, Probolinggo et Pasuruan où les espèces de moyenne grosseur sont d'abord éviscérées et salées, et de Muncar et de quelques autres régions où on les prépare à l'état entier. Les petits poissons comme les sardines/*teri* et tembang (esp. *Sardinella*) sont toujours séchées entières. Les sardines/lemuru (esp. *Clupea*) de Muncar sont parfois vidées et étêtées. Lorsqu'elles perdent de leur fraîcheur, elles sont séchées après avoir été fortement salées.

Certains détaillants (9 sur 22) ont fait valoir que les consommateurs préfèrent le poisson éviscéré parce que plus propre ; 12 ont noté une préférence pour les poissons ouverts comme étant propres, bien séchés, pas trop salés et pouvant se conserver assez longtemps. Cinq des six grossistes achetant et vendant de 100 à 300 kg de poisson par semaine ont confirmé ces informations.

Parmi les 98 consommateurs interrogés, 46 ont dit préférer le poisson éviscéré et 32 le poisson entier de bonne qualité. 20 % choisiraient le poisson ouvert. Une majorité (63 %) ont expliqué qu'ils préparaient le poisson séché en friture dans l'huile, environ 4 % le cuisaient avec des légumes pulpeux, environ 12 % avec de la noix de coco et 21 % l'accommodaient avec d'autres garnitures comme plat secondaire. Quant à la fréquence de consommation, elle était quotidienne pour 11 %, de plus d'une fois par semaine pour 74 % et de quelques jours par mois pour 15 %. Les quantités variaient de 0,25 à 1 kg par semaine. La plupart des acheteurs consomment le poisson le même jour, mais quelques-uns le conservent pendant 2 à 5 jours.

Aucun poisson n'était complètement non salé, tous incorporant de faibles quantités de sel dans leur préparation. Les poissons qualifiés de salés étaient considérés comme en contenant de fortes quantités. Tous les détaillants vendaient le poisson séché « non salé » et salé.

Le salage très concentré, d'après les détaillants, rend le poisson humide par temps pluvieux, et tacheté de blanc par temps sec par suite de la recristallisation du sel à sa surface. Les consommateurs apprécient peu le poisson très salé, 3 des 22 détaillants ont rapporté qu'ils le débarras-

saient de la croûte salée en le frottant avec des écales de noix de coco humectées d'eau.

En ce qui concerne la qualité, les détaillants ont signalé que les sardines/lemuru (esp. *Clupea*) de Muncar subissent les changements de couleur les plus rapides (rougeâtre ou brunâtre). La coloration passe pour provenir de la graisse présente dans la chair. Les produits éviscérés et étêtés, également, se détériorent rapidement.

D'après la même source, les prix restent stables pendant une couple de mois. Le volume des ventes tend à baisser avec l'arrivée sur le marché de grandes quantités de pindang (poisson bouilli) ainsi que durant la saison du poisson frais. Les produits séchés restent cependant à la portée des consommateurs, en particulier le *teri* (esp. *Stolephorus*), au prix de 300 NRPH/kg, ainsi que le *kurisi* à 800 NRPH/kg. Beaucoup de consommateurs achètent ces petits poissons parce qu'il y en a plus dans un kilogramme.

La présente enquête souligne la nécessité de mettre au point des procédés de salage et de séchage ne comportant que le minimum de sel compatible avec une durée de conservation répondant au genre de commerce et aux habitudes de l'est de Java.

Remerciements

Nous remercions le Dr William Edwardson pour les directives et les conseils dont il nous a fait profiter. Cet exposé porte sur une partie des recherches sur la préparation du poisson en Indonésie, financées par le CRDI.

Le séchage des grains de céréales aux Philippines

S.C. Andales[1]

Résumé Examen de la théorie du séchage, avec une attention spéciale à la composition et à la nature du grain ainsi qu'au séchage à air. Y sont décrites différentes techniques pouvant affecter le processus du séchage. On y traite également des analyses macroscopiques et microscopiques de la transmission de la chaleur et du déplacement dans la masse. Les distinctions entre le séchage en couches minces et épaisses y sont aussi abordées.

Cet exposé passe en revue les principes et la théorie du séchage des grains ; il décrit diverses méthodes typiques de séchage et énonce les deux façons d'effectuer l'analyse de la transmission de la chaleur et de l'extraction de l'humidité. On devra cependant tenir compte des limites imposées aux équations et aux techniques décrites. Il peut donc exister certaines divergences quand celles-ci sont appliquées pratiquement.

Théorie du séchage

D'après les conventions, le séchage est le procédé qui permet d'extraire d'un produit l'excès d'humidité qui s'y trouve. Cette extraction, totale ou partielle, s'appelle déshydratation. Pour comprendre ce qu'est le séchage du grain, il faut d'abord connaître la composition et la nature de ce dernier, ainsi que celles du medium classique qui intervient dans ce processus de déshumidification et qui n'est autre que l'air atmosphérique.

Composition et nature de l'air atmosphérique

L'atmosphère ambiante dans laquelle se trouve ordinairement le grain à un moment donné est un mélange d'air sec (celui-ci, à son tour, est un composé d'oxygène (20,95 %), d'azote (78,09 %), d'acide carbonique (0,03 %), d'argon (0,93 %) et de vapeur d'eau, d'où le terme d'air humide. La quantité de vapeur d'eau par unité de poids d'air sec est appelée techniquement taux d'humidité ou humidité absolue.

La vapeur d'eau de l'air exerce une certaine pression qui dépend de sa quantité, conformément à la loi des mélanges de Dalton. Le rapport entre la pression effective de la vapeur de l'air et la pression à saturation (l'état dans lequel l'air contient le maximum possible d'humidité) est appelé humidité relative (HR).

Les propriétés de l'air sec et de la vapeur d'eau ainsi que leurs rapports sont exposés dans l'étude de la psychrométrie. Les opérations comportant l'intervention de l'air peuvent être enregistrées sur la carte psychrométrique (Fig. 1).

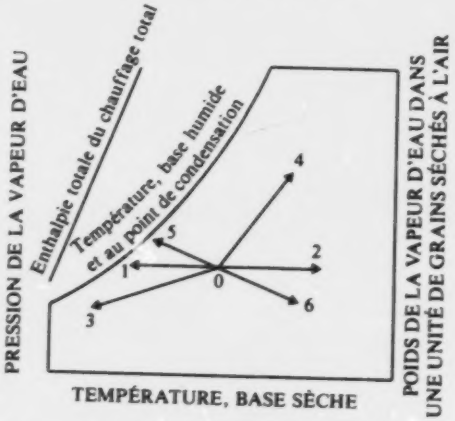

Fig. 1. Différents effets de l'air dans la carte psychrométrique : 0-1 refroidissement, 0-2 échauffement, 0-3 refroidissement et déshumidification, 0-4 réchauffement et humidification, 0-5 (saturation adiabatique) et 0-6 dessication (déshumidification chimique).

1. Department of Agricultural Process Engineering, University of the Philippines at Los Baños, College, Laguna 3720, Philippines.

Composition et nature des grains de céréales

Les grains de céréales sont composés de matières sèches (surtout amidon) et d'humidité. A la moisson ces grains ont normalement un excès d'humidité qui s'oppose à leur bonne conservation ou les rend impropres à la mouture. La teneur en humidité (TH) du grain s'exprime généralement en pourcentage du contenu humide soit sur base sèche (bs), soit sur base humide (bh).

Le grain de céréale est par nature hygroscopique, ce qui veut dire qu'il peut absorber ou perdre de l'humidité d'après les conditions de son environnement. Le déplacement de l'humidité pénétrant dans le grain ou en sortant est fonction de la différence de pression existant entre la vapeur contenue dans le grain et celle de l'air ambiant. Si la pression de la vapeur dans le grain dépasse la pression de vapeur de l'air, le déplacement de l'humidité s'effectuera du grain à l'air et produira ainsi le séchage. Pareillement, si c'est la pression de la vapeur dans l'air qui est plus forte que celle dans le produit, le déplacement de l'humidité se fera de l'air au grain, ce qui affectera son absorption par le grain.

La matière hygroscopique peut contenir l'une ou l'autre de deux formes d'humidité : captive et non captive. L'humidité captive est le contenu en humidité d'un grain dont la pression de vapeur est moindre que la pression de l'eau libre, à la température du grain. Un produit atteint le maximum d'humidité captive lorsqu'il est exposé à l'air ambiant à 100 % de HR.

L'humidité non captive est celle qui est présente dans le produit en excès de ce maximum. Elle se comporte comme de l'eau libre, avec une pression de vapeur égale à la pression de l'eau libre.

L'humidité captive est en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Le contenu d'humidité captive en équilibre avec l'air à une certaine humidité relative est appelé teneur en humidité d'équilibre (TH_e). L'humidité relative de l'air, dans cette situation est appelée humidité relative d'équilibre (HR_e). L'humidité excédant la teneur en humidité d'équilibre (captive ou non captive) est appelée humidité libre et correspond à la quantité qui peut être extraite du grain au contact prolongé d'un air dont l'humidité relative est l'humidité relative d'équilibre (Tableau 1).

Techniques affectant le séchage des grains de céréales

Il existe plusieurs façons de provoquer des différences de pression entre la vapeur présente dans le grain et celle de l'air et d'affecter ainsi le séchage. On peut soit accroître la quantité de vapeur dans le grain ou réduire celle de l'air, ou encore effectuer les deux simultanément. Les techniques permettant d'augmenter la pression de la vapeur dans le grain sont les suivantes :

Séchage solaire : Les grains sont étendus sur une aire de séchage directement exposée aux rayons du soleil. Ces derniers chauffent le grain et augmentent la pression de la vapeur d'eau qui s'y trouve. L'air ambiant (la brise) à faible HR absorbe l'humidité ainsi dégagée. Sur la carte psychrométrique, ce processus est représenté par la figure 2.

Séchage aux infrarouges : Les grains sont chauffés directement par des rayons infrarouges provenant d'une source appropriée et qui accroissent la pression de vapeur du contenu humide. L'air ambiant en contact avec le grain réchauffé absorbe l'humidité du grain.

Séchage par conduction : Les grains sont chauffés sur une surface en contact direct avec eux. Cette surface, formée en général de plaques en métal, est chauffée par un combustible brûlant sous leur face inférieure. La transmission de la chaleur s'effectue ainsi par conduction. Le chauffage augmente la pression de vapeur du contenu humide du grain et l'air ambiant circulant en contact avec lui recueille l'humidité ainsi libérée.

Les techniques permettant d'abaisser la pression de la vapeur dans l'air relativement au point de saturation (ou de réduire l'humidité relative) sont les suivantes :

Séchage à air chaud : L'air est chauffé directement ou indirectement par une source calorifique (combustibles, chauffage électrique ou énergie solaire). Ce chauffage élève la température de l'air et diminue son humidité relative. Cet air chaud, au contact du grain plus froid, provoque une transmission de la chaleur par une sorte de convection, et réalise simultanément un déplacement de l'humidité du grain vers l'air. Ce processus est schématisé dans la figure 3 de la carte psychrométrique.

Séchage par l'air asséché : L'air doit traverser une substance absorbante comme un colloïde de silicium qui retient l'humidité. L'air asséché ne possède plus qu'une faible humidité relative, et une température légèrement plus élevée. Au contact du grain humide, l'évacuation dans la masse procède du grain vers l'air simultanément avec la transmission de la chaleur par convection. Sur la carte psychrométrique, ce processus est présenté dans la figure 4.

Séchage à l'air réfrigéré : L'air doit traverser l'évaporateur d'un dispositif de réfrigération. Pendant ce passage, la température de l'air

Tableau 1. Équilibre hygroscopique du riz non décortiqué.[a]

% d'humidité (bh)	Humidité relative d'équilibre (%) aux températures suivantes (° F)											
	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	2,0	3,1	4,6	6,8	9,8	14,0
2	0,4	0,6	0,9	1,3	1,9	2,8	4,0	5,6	7,7	10,5	14,2	18,9
3	1,1	1,5	2,1	2,9	3,9	5,3	7,0	9,2	11,9	15,3	19,4	24,5
4	2,5	3,3	4,3	5,5	7,0	8,9	11,2	13,9	17,2	21,0	25,5	30,7
5	5,0	6,2	7,7	9,4	11,5	13,9	16,6	19,8	23,4	27,5	32,1	37,3
6	8,8	10,6	12,5	14,8	17,3	20,1	23,2	26,6	30,4	34,6	39,1	44,0
7	14,2	16,4	18,7	21,3	24,2	27,2	30,5	34,0	37,8	41,9	46,1	50,7
8	21,0	23,5	26,1	28,9	31,9	35,0	38,3	41,8	45,4	49,1	53,1	57,1
9	28,8	31,5	34,2	37,1	40,0	43,1	46,2	49,4	52,8	56,2	59,6	63,2
10	37,3	40,0	42,6	45,4	48,2	51,0	53,9	56,8	59,8	62,7	65,8	68,8
11	46,0	48,5	51,0	53,5	56,0	58,6	61,1	63,7	66,2	68,8	71,3	73,8
12	54,4	56,6	58,9	61,1	63,3	65,5	67,7	69,8	72,0	74,1	76,2	78,3
13	62,2	64,1	66,0	68,0	69,8	71,7	73,5	75,3	77,1	78,8	80,5	82,2
14	69,1	70,8	72,4	74,0	75,6	77,1	78,6	80,0	81,4	82,8	84,2	85,5
15	75,2	76,6	77,9	79,2	80,4	81,7	82,9	84,0	85,1	86,2	87,3	88,3
16	80,4	81,5	82,5	83,5	84,5	85,5	86,4	87,3	88,2	89,1	89,9	90,7
17	84,7	85,5	86,3	87,1	87,9	88,7	89,4	90,1	90,8	91,4	92,0	92,7
18	88,2	88,8	89,4	90,1	90,6	91,2	91,8	92,3	92,8	93,3	93,8	94,2
19	91,0	91,5	91,9	92,4	92,8	93,3	93,7	94,1	94,5	94,8	95,2	95,5
20	93,2	93,5	93,9	94,2	94,6	94,9	95,2	95,5	95,8	96,0	96,3	96,6
21	94,9	95,2	95,4	95,7	95,9	96,1	96,4	96,6	96,8	97,0	97,2	97,4
22	96,2	96,4	96,6	96,8	97,0	97,1	97,3	97,4	97,6	97,7	97,9	98,0
23	97,2	97,4	97,5	97,6	97,7	97,9	98,0	98,1	98,2	98,3	98,4	98,5
24	98,0	98,1	98,2	98,3	98,4	98,4	98,5	98,6	98,7	98,7	98,8	98,9
25	98,5	98,6	98,7	98,7	98,8	98,9	98,9	99,0	99,0	99,1	99,1	99,2

a) Adapté d'après Houston (1972, p. 144). L'exactitude des chiffres extrapolés au-delà du registre de températures de 77–111 °F n'a pas été vérifiée expérimentalement.

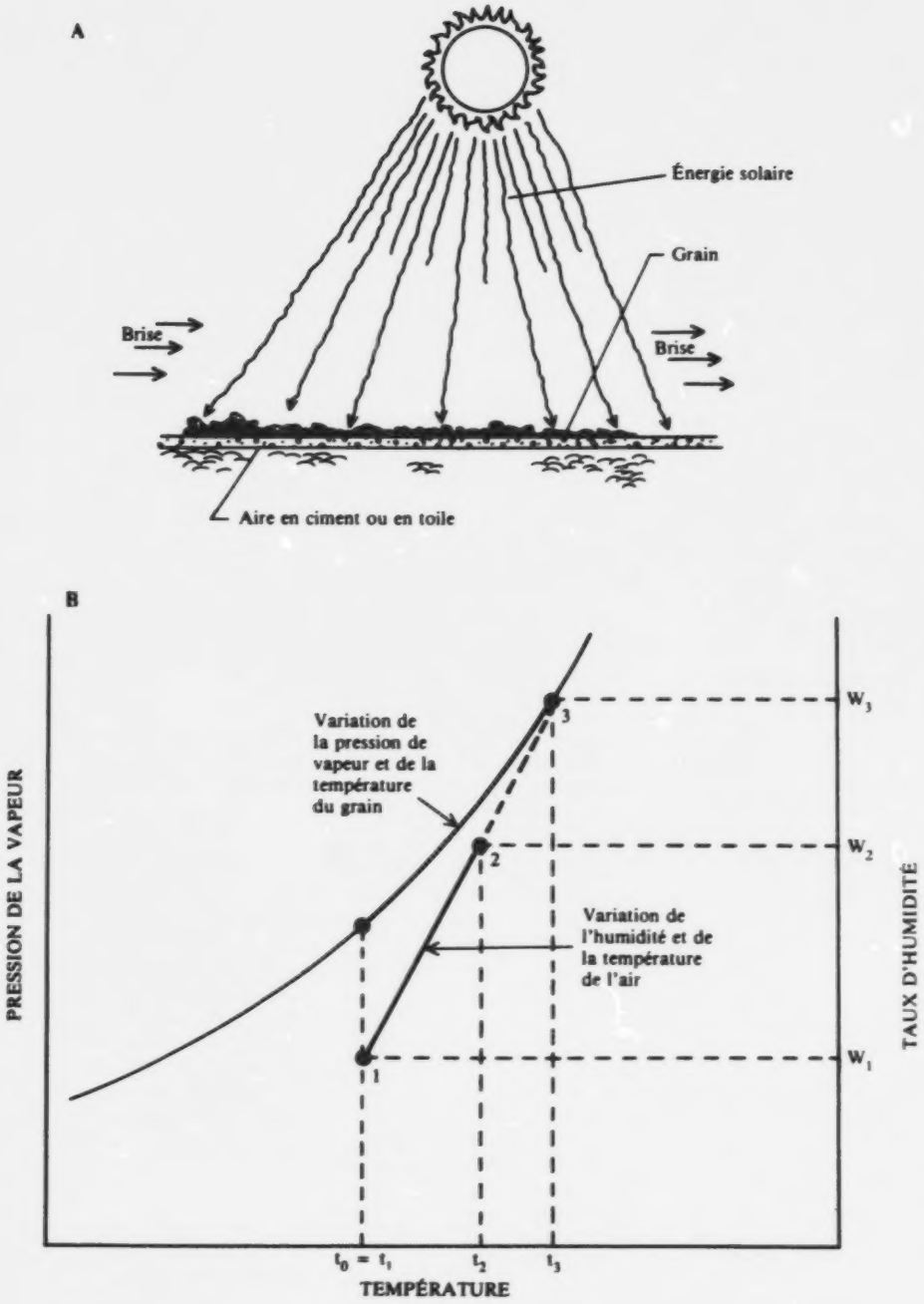

Fig. 2. Augmentation de la pression de vapeur dans le grain par chauffage solaire : (A) séchage schématisé et (B) processus du séchage sur la carte psychrométrique.

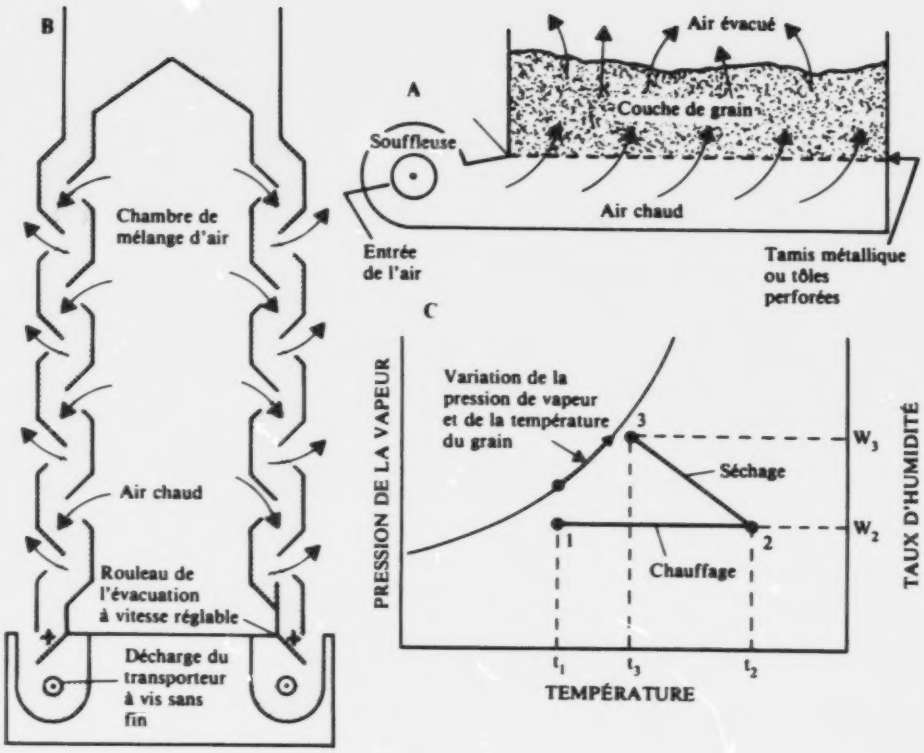

Fig. 3. Réduction de l'humidité relative de l'air par chauffage : (A) séchage à l'air chaud sur fond plat, (B) séchage à l'air chaud par circulation continue, et (C) processus du chauffage et du séchage sur la carte psychrométrique.

s'abaisse et l'humidité qu'il contient se condense. Cet air à basse température et à faible humidité absolue possède une humidité relative élevée.

Cet air réfrigéré doit ensuite traverser le condenseur du dispositif de réfrigération, ce qui a pour effet d'abaisser son humidité relative. Lorsque l'air passe ensuite à travers la couche de grain, il se produit simultanément un transfert de chaleur par convection de l'air au grain et une évacuation de l'humidité du grain vers l'air. Sur la carte psychrométrique, ce processus est présenté dans la figure 5.

Séchage en couche épaisse

Là où les conditions de l'air ambiant conviennent déjà au séchage, on peut se dispenser de moyens artificiels pour générer la différence de pression de vapeur entre le grain et l'air, d'où ce qu'on appelle le « séchage à l'air ». Dans le séchage en couche épaisse, l'air se déplace du fond vers la surface. Le transfert d'humidité du grain à l'air se produit dans une profondeur, ou zone, limitée du grain. Au début du processus de séchage cette zone se trouve au bas de la couche. A mesure qu'il se poursuit, la zone se déplace de bas en haut et lorsqu'elle traverse toute la couche, la masse entière est séchée au point d'équilibre avec l'air de séchage.

Le grain sousjacent à la zone de séchage a, essentiellement, atteint un état d'équilibre avec l'air entrant et son contenu humide est égal à la teneur en humidité d'équilibre correspondant à l'humidité relative de l'air. Ce grain sousjacent est considéré comme sec. Celui de la partie supérieure à cette zone n'a pas commencé à sécher et possède encore un contenu humide égal à la teneur en humidité initiale (TH_i). Le grain s'y trouvant est appelé grain humide.

Dans ce procédé de séchage, l'air chaud à très faible humidité relative ne convient pas parce qu'il provoquera un surséchage de la partie

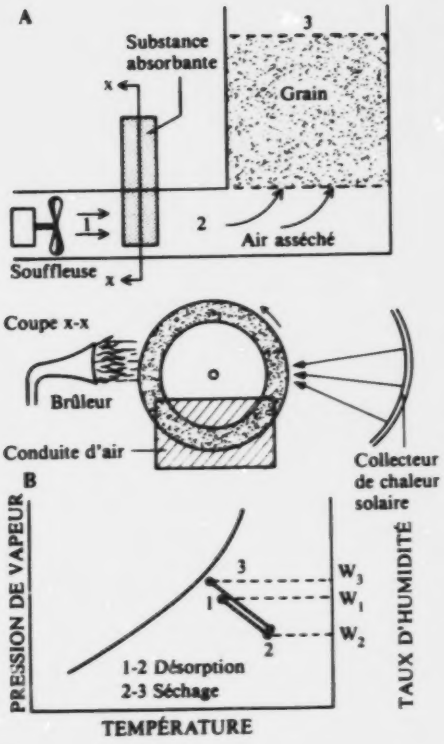

Fig. 4. Diminution de l'humidité relative de l'air en l'asséchant à l'aide d'une substance absorbante, un colloïde de silicium. (A) Schéma du séchage à l'air asséché, et (B) Processus d'asséchage et de séchage dans la carte psychrométrique.

inférieure du grain lorsque la partie supérieure aura séché à la teneur en humidité souhaitable. Toutefois, si l'air possède une humidité relative élevée, la zone de séchage risque de n'atteindre le haut de la couche qu'après un temps exagérément long, et d'exposer aux moisissures le grain s'y trouvant.

La répartition du contenu humide dans toute la couche de séchage s'effectue d'après un ordre donné durant le processus de séchage. Les courbes d'humidité-temps sont fonction de la hauteur de la couche, de la vitesse de l'air, de sa température et de son humidité relative. En règle générale, une hauteur faible et une vitesse de l'air élevée engendrent des courbes plus rapprochées l'une de l'autre. Une baisse de température de l'air aura le même effet mais la durée du séchage sera prolongée. Par contre, une hauteur accrue et une faible vitesse de l'air produiront des courbes plus éloignées l'une de l'autre. Toute élévation de la température de l'air ou toute baisse de l'humidité relative abrégera la durée du séchage mais fera s'écarter plus encore les courbes de séchage.

Analyse macroscopique de la transmission de la chaleur et de l'humidité dans le séchage du grain

Pour le cultivateur ou l'entrepreneur de séchage, l'analyse macroscopique de l'opération revêt la plus grande importance. Compte tenu de l'état initial du grain et de l'air ambiant, outre d'autres informations telles que l'usage prévu du grain et le mode de séchage envisagé, les intéressés devront accorder plus d'attention à d'autres facteurs tels que la quantité d'humidité à évacuer, le volume d'air à utiliser, la quantité de combustible à consumer et l'énergie requise pour le dispositif de séchage. La corrélation des résultats dans le calcul de la durée du séchage entre les analyses brute (macroscopique) et théorique (microscopique) dépendra de la précision des instruments de mesure et devrait s'établir en deçà de 10 %.

Analyse microscopique de la transmission de la chaleur et de l'évacuation de l'humidité dans le séchage du grain

Les cultivateurs et les entrepreneurs de séchage s'inquiètent sans doute peu du mécanisme détaillé du séchage. Les scientifiques et les ingénieurs doivent cependant connaître celui-ci pour leur permettre d'agir sur les facteurs affectant le processus et s'en inspirer dans la conception d'installations de séchage et dans la recherche d'améliorations aux techniques actuelles.

Régimes des périodes de séchage

Les recherches précédentes ont fait ressortir l'idée que le processus de séchage par convection pouvait se diviser en trois phases (Threlkeld, 1965). Comme l'indique la figure 6, le régime de séchage est fonction de la teneur en humidité du produit. La phase « A » représente la zone à « régime de séchage constant ». La surface humide du produit s'y comporte comme une surface d'eau libre. La phase se poursuit tant que de

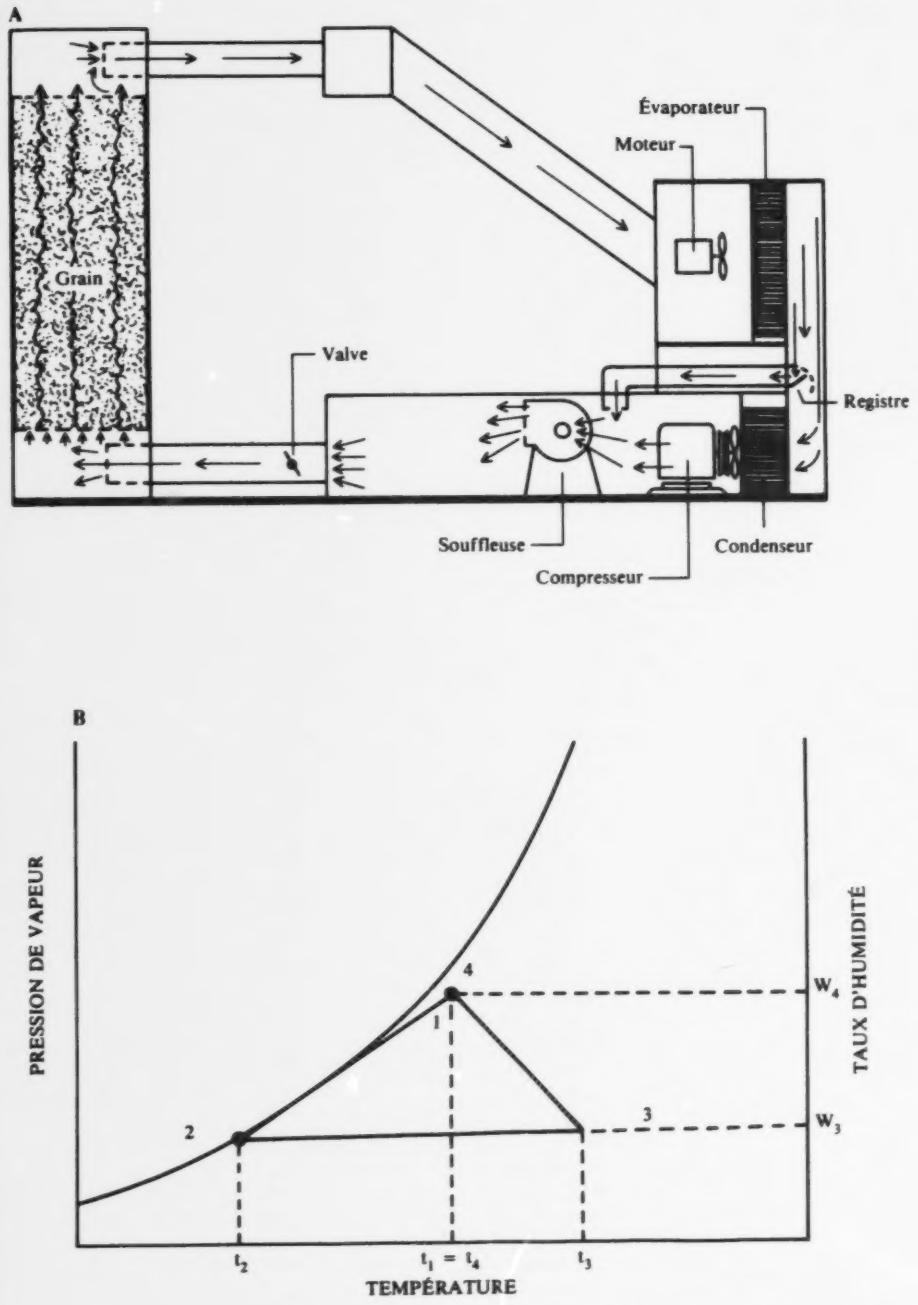

Fig. 5. Réduction de l'humidité relative de l'air à l'aide d'un dispositif de réfrigération : (A) schéma d'un séchoir à air réfrigéré, et (B) processus de refroidissement, de chauffage et de séchage dans la carte psychrométrique.

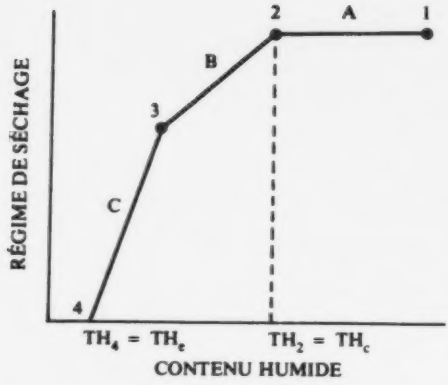

Fig. 6. Régime de séchage d'un produit humide.

l'humidité parvient à la surface avec une rapidité égale à celle de l'évaporation. Elle se termine lorsque la teneur critique en humidité (TH_c) est atteinte. Cette dernière est en fonction du produit à sécher et de son épaisseur.

La phase « B » est appelée « première phase à régime décroissant ». La zone en question est caractérisée par un régime de séchage décroissant par suite de la réduction de la surface humide. A mesure que le séchage progresse, la fraction de surface humide finit par disparaître, et la phase « B » prend fin.

La phase « C » est qualifiée de « deuxième phase à régime décroissant » et est caractérisée par l'évaporation qui se produit sous la surface. Quand l'opération est prolongée, la phase se poursuit jusqu'à ce qu'on atteigne la teneur en humidité d'équilibre.

Le séchage du grain a lieu en majeure partie au cours de cette deuxième phase à régime décroissant, dans laquelle deux processus interviennent : déplacement de l'humidité interne du produit vers la surface, et évacuation de cette humidité de ladite surface.

Brooker et alii (1974) ont énuméré six mécanismes physiques différents proposés par les chercheurs pour décrire le déplacement de l'humidité dans une matière poreuse durant le séchage, soit : (1) circulation capillaire, (2) diffusion en liquide, (3) diffusion en surface, (4) diffusion en vapeur, (5) diffusion thermique, et (6) circulation hydrodynamique. Henderson et Perry (1976) ont souligné que si le contenu humide est une humidité captive, la diffusion est censée constituer le mécanisme primaire du déplacement de l'humidité dans le grain.

Équation de l'extraction de l'humidité dans le séchage de grains isolés

A l'intérieur du solide, le déplacement par diffusion dans la masse est semblable à la conduction de la chaleur dans un solide, et l'équation suivante s'applique :

$$(1) \qquad (\delta G / \delta \theta) = -D_v \rho A(\delta TH / \delta X)$$

dans laquelle G = la quantité d'humidité (kg), θ = le temps (heures), D_v = diffusivité dans la masse (m^2/ heure), ρ = densité du solide à sec (kg/m^3), A = surface (m^2), TH = teneur en humidité en décimales (kg/ kg) et X = la distance à partir du centre de la masse en voie de séchage (m).

À la surface, le déplacement de l'humidité est fonction du gradient de concentration de l'humidité entre l'air de séchage et la surface du produit, et l'équation suivante s'applique :

$$(2) \qquad -D_v \rho(\delta TH / \delta X) = S(TH_s - TH_e)\rho$$

$$(3) \qquad (\delta TH / \delta \theta) = D_v(\delta^2 TH / \delta X^2)$$

dans laquelle S = la conductance en surface (m/ heure), TH_s = teneur en humidité à la surface (% bs) et TH_e = teneur en humidité d'équilibre à l'humidité relative de l'air de séchage (% bs).

La solution des équations (1) et (3) établit un rapport indiquant la variation du contenu humide d'après le temps et la géométrie du produit. Les équations (1) et (3) peuvent se résoudre par des méthodes soit numériques, soit analytiques.

Équation de la transmission de la chaleur dans le séchage du grain

De façon générale, le processus de séchage comporte quatre mouvements circulatoires distincts de la chaleur entre le grain et son environnement : chaleur latente en vertu de l'évaporation de l'humidité (q_l), chaleur sensible due au déplacement par convection (q_c), chaleur sensible due au déplacement par radiation (q_{cr}), et chaleur sensible due au déplacement par conduction (q_{cc}). Ces quatre mouvements circulatoires sont exprimés comme suit :

$$(4) \qquad q_l = q_c + q_{cr} + q_{cc}$$

La figure 7 présente schématiquement ces différents courants d'énergie. En appliquant un bilan calorifique à une unité de surface du grain on obtient l'équation suivante :

$$(5) \qquad h_d(W_s - W)h_{fg} = h_c(t - t_s) + h_r(t_r - t_s) + U(t_\infty - t_s)$$

dans laquelle : W_s = taux d'humidité de l'air

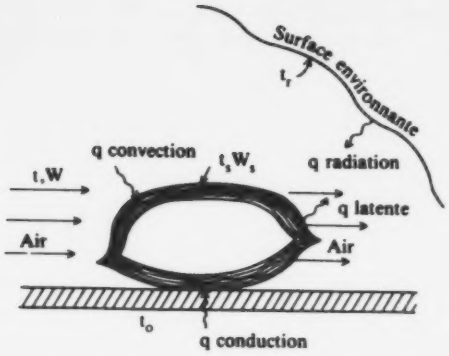

Fig. 7. Diagramme schématique du déplacement de chaleur entre le grain et la surface environnante.

saturé à la surface du grain, W = taux d'humidité de l'air de séchage, t = température de l'air de séchage, t_s = température de surface du grain, t_r = température de la surface environnante, t_o = température de l'environnement en dessous de la base de support, h_d = coefficient de déplacement dans la masse, h_c = coefficient de transmission de la chaleur par convection, h_r = coefficient de transmission de la chaleur par radiation, U = coefficient de transmission globale de la chaleur de la base de support, et h_{fg} = chaleur latente de vaporisation de l'eau à t_s.

Si les effets de la radiation et de la conduction sont négligeables, comme lors du séchage ordinaire par convection, l'équation (5) devient :

$$(6) \qquad (W_s - W)h_{fg} = (h_c / h_d C_p)C_p(t - t_s) = L_e C_p(t - t_s)$$

A noter que si le nombre Lewis (L_e) est une unité, le processus du séchage constitue une transformation adiabatique de saturation où t_s égale la température à l'état humide.

Équations de la transmission de chaleur et de l'évacuation de l'humidité dans le séchage en couche profonde

Les valeurs exprimées dans les paragraphes précédents s'appliquaient au séchage effectué sur des grains séparés ou en couche mince. Si intéressantes que soient ces analyses, les équations qui en résultent n'ont qu'une valeur limitée du fait que l'on effectue rarement le séchage de grains de céréales isolés ou en couche mince. Le séchage s'exerce surtout sur une couche épaisse fixe ou en mouvement.

L'application des lois fondamentales de la transmission de la chaleur et de l'évacuation de l'humidité à un système de séchage en couche profonde conduit à une série assez compliquée d'équations différentielles partielles. Cependant, en adaptant des hypothèses simplificatrices valides, en exprimant les équations différentielles partielles sous forme de différences limitées, et avec l'aide de gros calculateurs numériques, on peut arriver à une prédiction précise des conditions de l'air et du grain, n'importe quand et n'importe où.

Brooker et alii (1974), ont soumis huit hypothèses valides pour la solution de quatre inconnues, à savoir : (1) la température moyenne du grain, t ; (2) le contenu moyen en humidité du grain, TH_g ; (3) la température de l'air, T ; et (4) le taux d'humidité de l'air, W. On a dressé quatre bilans de la transmission de chaleur et de l'évacuation de l'humidité pour parvenir à la série des quatre équations différentielles (7-10) applicables à un séchoir à couche fixe. Brooker et alii (1974) ont présenté la dérivation de ces équations) :

$$(7) \quad (\delta t / \delta\theta) = (h_a / \rho_p C_p + \rho_p C_w TH_g)(T - t) + [h_{fg} + C_v(T - t)] / [\rho_p C_p + \rho_p C_w TH_g] G_a(\delta W / \delta X)$$

$$(8) \quad (\delta TH_g / \delta\theta) = \text{une équation appropriée pour couche mince, disons, } D_v(\delta^2 TH_g / \delta X^2)$$

$$(9) \quad (\delta T / \delta X) = -h_a(T - t) / (G_a C_a + G_a C_v W)$$

$$(10) \quad (\delta W / \delta X) = (-\rho_p / G_a)(\delta TH_g / \delta\theta)$$

dans lesquelles t = température du grain, TH_g = teneur en humidité du grain, T = température de l'air, W = taux d'humidité de l'air, h_a = coefficient de transmission de la chaleur par convection, ρ_p = densité du produit, C_p = chaleur spécifique du produit, C_w = chaleur spécifique de l'eau, C_v = chaleur spécifique de la vapeur, h_{fg} = chaleur de vaporisation de l'eau, G_a = taux de circulation dans la masse, et X = coordonnée de la couche de séchage.

La transformation du système ci-dessus d'équations différentielles partielles en équations à différence limitée permet d'atteindre une solution à l'aide de gros ordinateurs. Il existe un certain nombre de programmes de simulation par ordinateur pour les systèmes de séchage. Par exemple, des programmes de cette nature ont été mis au point par la Michigan State University pour le maïs, et par la Kansas State University pour le maïs et le riz. Brooker et alii (1974) ont présenté un échantillon de résultats obtenus d'un ordinateur avec le maïs, et Chang et alii (1978) en ont fait autant avec le riz.

Grâce à ces modèles de simulation mentionnés

plus haut, on pourrait facilement étudier les divers effets des paramètres du séchage sans devoir recourir à une expérimentation laborieuse et onéreuse.

Performance du séchoir

La performance des séchoirs différera d'après l'attention apportée à la conception, à la fabrication et au fonctionnement du système. À ce point de vue, les objectifs poursuivis sont les suivants :

(1) La qualité du grain doit être préservée et, pour le paddy notamment, le grain ne doit pas se fêler ni craquer.

(2) Le lot de grain entier doit subir un séchage uniforme.

(3) Le séchage doit s'effectuer assez rapidement pour éviter la germination et la formation de moisissures.

(4) Le séchoir doit utiliser efficacement l'énergie. L'on doit notamment pouvoir maximaliser le potentiel de séchage de l'air chaud.

Pour apprécier la performance d'un séchoir, l'on doit en connaître les caractéristiques de service, ou pouvoir les déduire et les comparer avec des indices connus tels que :

(1) Pression statique dans la chambre de mélange — elle fournit une indication de l'air débité par le ventilateur, que l'on peut ensuite vérifier approximativement avec un anémomètre.

(2) Le contenu humide du grain dans les couches du haut et du bas et en divers points de la masse afin de contrôler le progrès et l'uniformité du séchage.

(3) La température et l'humidité relative de l'air évacué, comme indication du degré d'utilisation du potentiel de séchage de l'air.

(4) La température de l'air de séchage et, quand on le peut, la température effective du grain, en particulier des couches inférieures, lorsqu'elle approche de 14 %.

(5) La vitesse du ventilateur en tr/mn. Utile lorsqu'on connaît les caractéristiques de l'appareil.

(6) La quantité de combustible consommée par le brûleur. Si l'on peut mesurer le débit d'air avec une précision raisonnable, on pourra en déduire le degré d'efficacité de la combustion. On peut également parvenir à la même déduction d'après la charge d'humidité, si l'on connaît la chaleur de vaporisation.

(7) La chaleur de l'air ambiant, à l'état sec, et son humidité relative. On peut ensuite suivre le processus sur la carte psychrométrique.

(8) La durée effective du séchage.

(9) La preuve finale est la qualité meunière de l'échantillon de grain prélevé en divers endroits des couches supérieure et inférieure. La qualité meunière représente, essentiellement, le rendement total en meunerie et le pourcentage de riz de première catégorie. On peut la comparer avec un échantillon-témoin séché à l'air ou dans un séchoir d'échantillonnage.

La différence existant entre un système de séchage bien conçu et un autre assemblé sans assez se soucier des règles de la thermodynamique, de la mécanique des fluides et des propriétés physiques du grain se répercute sur la performance du séchoir.

Remerciements

Nous remercions M. D. de Padua, du Southeast Asia Cooperative Post-Harvest Research and Development Programme (SEARCA) pour le concours qu'il nous a apporté dans la préparation de certaines parties de cet exposé.

Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. et Hall, C.V. 1974. Drying cereal grains. Connecticut, USA, AVI Publishing Co., Inc.

Chang, D.I., Chung, D.S. et Pfost, H.B. 1978. Simulation of natural air drying of rough rice. Kansas, USA, Food and Feed Grain Institute, Kansas State University, AID ta-C-1162.

Henderson, S.M. et Perry, R.L. 1976. Agricultural process engineering. Connecticut, USA, AVI Publishing Co., Inc.

Houston, D.F., ed. 1972. Rice chemistry and technology, vol. IV. Minnesota, USA, America Association of Cereal Chemists, 517 p.

Mauren, S.G. et Pfost, H.B. 1978. Design of natural air grain drying systems. Manhattan, Kansas, USA, AID ta-C-1162, Food and Feed Grain Institute, Kansas State University.

Threlkeld, J.L. 1965. Thermal environmental engineering. New Jersey, USA. Prentice-Hall Inc.

Le séchage des oignons au Niger

A. Ba, Ch. Banzet et J.M. Degbe[1]

Résumé Cet exposé décrit la recherche effectuée à ce jour sur un séchoir solaire indirect à convection forcée. L'air de séchage a été considéré comme un gaz parfait et l'on a établi des rapports permettant aux chercheurs de déterminer la transmission de la chaleur et l'évacuation de l'humidité dans le collecteur, dans la chambre de séchage et, conséquemment, dans le séchoir comme tel. De plus, on y décrit diverses caractéristiques de service du séchoir.

On consomme beaucoup d'oignon au Niger, soit dans des sauces ou dans des ragoûts. Jusqu'à présent, l'unique méthode de séchage en usage était l'exposition au soleil. Le procédé traditionnel consiste à ouvrir les oignons à peu près mûrs et à entasser les folioles dans un silo creusé dans le sol où on les laisse fermenter. Le produit partiellement fermenté est ensuite séché au soleil. Dans cet état, il est souvent infecté d'insectes, mélangé de terre, et microbiologiquement inacceptable.

Une vaste étendue du Niger est désertique. L'humidité relative y est inférieure à 30 % pendant la majeure partie de l'année. L'on y compte annuellement de 3 000 à 3 500 heures d'ensoleillement, et une radiation solaire globale moyenne de 650 W/m^2 annuellement. Dans ces conditions, le séchage des produits agricoles peut s'effectuer assez rapidement.

La culture des oignons, en général, ne se pratique que dans la Maggia ou vallée du Niger, sur de petites parcelles irriguées de 300 à 1 000 m^2 ; le rendement est de 25 à 30 tonnes à l'hectare. Les trois variétés préférées sont la blanche de Soumarana et les variétés blanches et rouges de Galmi.

Le présent exposé dépeint quelques caractéristiques de service du séchoir ainsi que les rapports qui ont permis au groupe de recherche de l'Office de l'énergie solaire (ONERSOL) de calculer la transmission de la chaleur et l'évacuation de l'humidité dans l'appareil de séchage.

Facteurs de la conception

Le groupe a tenu compte de l'importance du goût, de la couleur et de l'aspect général des oignons séchés. La température maximale de séchage a été de 50 à 55 °C ; la teneur finale en humidité (TH) devait être d'environ 5 %.

Le collecteur solaire a été construit d'aluminium A5. La surface de captage mesurait 2,32 × 1,00 m et était recouverte d'une plaque de verre de 3 mm d'épaisseur, avec isolation en laine de verre (6 cm) sur les côtés et au fond du collecteur. A une radiation globale de $600 \leqslant G \leqslant 900$ W/m^2 et pour un régime de circulation d'air de $190 \leqslant V \leqslant 225$ m^3/heure, les températures à la sortie du collecteur se situaient entre 35 et 60 °C.

La chambre de séchage, également en aluminium A5, comportait trois claies de 1,00 × 0,50 m écartées de 15 cm. Le treillage de ces claies est en mailles de fer de 1 × 1 cm, pour permettre une bonne circulation de l'air.

Transmission de la chaleur et extraction de l'humidité

La transmission de chaleur a lieu dans la chambre de séchage ainsi que dans le collecteur. L'évacuation de l'humidité s'effectue surtout dans la chambre de séchage. Dans le collecteur à plaque plate, on présumait que l'échauffement de l'air en mouvement se réalise sans augmentation du taux d'humidité. Se basant sur des expressions bien connues des processus psychrométriques impliqués, le groupe a pu mesurer l'énergie utile à l'intérieur du collecteur. Le rendement de ce dernier est défini comme le rapport existant entre l'énergie utile et le total de la radiation incidente globale reçue par la plaque collectrice.

La transmission de la chaleur et l'évacuation de l'humidité dans la tour s'effectuent comme suit : (a) dans les oignons, par diffusion (loi de Fick) ou

1. Office national de l'énergie solaire (ONERSOL), B.P. 621, Niamey (Niger).

par transfert de la chaleur par convection (loi de Fournier), et (b) dans l'air humide, par convection. Avec un processus à égalité d'enthalpie dans la chambre de séchage, on a pu établir le déplacement dans la masse et son efficacité. L'efficacité du séchoir est indiquée comme étant le produit des efficacités respectives du collecteur et de la chambre de séchage.

À toutes les 6 minutes, on a mesuré les températures de l'air à son entrée et à sa sortie du collecteur, les températures des plaques de verre dans le collecteur, la température de la plaque du collecteur, les températures de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage, ainsi que la radiation totale à l'aide d'un appareil de collecte de données Hewlett Packard.

Les résultats recueillis d'un nombre restreint de tests sont encourageants. D'autres sont actuellement en préparation en vue d'améliorer la performance du séchoir et la qualité des produits.

Le séchage du poisson aux Philippines

Ernesto V. Carpio[1]

Résumé Le séchage traditionnel au soleil en usage aux Philippines comporte plusieurs inconvénients, notamment des pertes causées par les dégâts subis par le produit, un séchage imparfait, les mouches, les manipulations inconsidérées et de mauvaises conditions d'entreposage. La réussite du séchage au soleil exigeant que la surface entière soit exposée à ses rayons, les aires nécessaires sont parfois considérables, alors que la plupart des transformateurs ne disposent que d'une étendue limitée et ne peuvent sécher qu'une partie du poisson aux périodes saisonnières de grande abondance. C'est pourquoi on a reconnu la nécessité de procédés mieux contrôlables et d'un équipement approprié qui permettraient d'obtenir le maximum de poisson séché pouvant être rapidement entreposé avec les meilleures chances de conservation.

Aux Philippines, le séchage des produits de la pêche est l'une des grandes industries de transformation nationales en même temps que l'un des procédés les plus anciens de conservation du poisson. Cette activité s'exerce avec beaucoup de souplesse grâce à sa dispersion en petites unités. Mais elle est, dans l'ensemble, importante en raison du volume qu'elle représente et parce que les surplus de poisson peuvent être apprêtés dans n'importe quel port avant leur distribution, ce qui contribue dans une certaine mesure à stabiliser les prix. Le volume total annuel est évalué à plus de 160 000 tonnes, poids séché, équivalent à 35 % du total des prises pour les Philippines, ce qui représente pour la population une source de protéine stable dont elle peut en tout temps profiter.

Le mode traditionnel de séchage consiste à saler le poisson soit entier soit ouvert par le milieu, selon la grosseur, et à l'immerger ensuite dans une saumure à 25 % de sel durant 6 à 7 heures, après quoi il est mis à sécher au soleil sur des nattes en bambou. Le produit ainsi obtenu a une teneur en humidité (TH) d'environ 30 à 40 % de son poids total, proportion qui peut du reste varier considérablement. Les espèces les plus couramment traitées de la sorte sont l'anchois, le maquereau, le « slipmouth », les némiptérides et le caranx.

La méthode générale de séchage au soleil ne va pas sans des inconvénients dont l'irrégularité de l'ensoleillement, même durant les périodes sèches, n'est pas l'un des moindres. Le séchage solaire est relativement lent, et le poisson étant une denrée très périssable les pertes sont parfois considérables et la qualité du produit séché manque souvent d'uniformité. Dans les régions côtières des Philippines où cette pratique est largement répandue et où l'humidité relative (HR) peut descendre jusqu'à 40 %, il faut en moyenne 1 à 2 jours (de 8 heures) pour sécher à 35 % de TH, base humide (bh), le hareng et le maquereau ouvert et éviscéré. Une autre menace à laquelle est exposé le poisson séché au soleil en plein air, est celle des mouches. Aux heures de moindre intensité solaire, au commencement et à la fin du jour, les asticots se développent et désagrègent plus ou moins la chair du poisson. Les oeufs déposés vers la fin de la journée peuvent éclore et avarier ensuite le produit une fois entreposé. Le séchage au soleil dépend pour une bonne part de la superficie totale exposée aux rayons et exige donc d'assez grandes surfaces. Les transformateurs ne disposant le plus souvent que de peu de terrain, il arrive qu'en saisons de pêche abondante, on ne puisse sécher qu'une partie des prises. Les manipulations du produit en périodes de pluies subites constituent un autre problème. On doit donc rechercher des procédés susceptibles d'être mieux contrôlés avec un équipement approprié, afin de pouvoir conserver le maximum de poisson séché après un traitement assez rapide pour répondre aux arrivages de la pleine saison de pêche.

1. Department of Food Science and Technology, University of the Philippines at Los Baños, College, Laguna 3720, Philippines.

Théorie du séchage

Hall (1957) a défini le séchage des produits alimentaires comme étant l'extraction de son contenu humide jusqu'à l'obtention d'un milieu environnant qui s'oppose au développement des bactéries et des moisissures. Il importe donc d'effectuer la déshydratation dans le plus bref délai possible pour minimiser les risques de dégâts à caractère microbiologique.

Teneur en humidité d'équilibre

On a étudié à l'Université des Philippines, de Los Baños (UPLB, 1979) les isothermes pour l'anchois, le maquereau et le hareng dans les limites d'humidité relative de 20 à 80 %. Les expériences ont révélé que, à une humidité relative faible comme celle qui existe dans le séchoir, on n'a relevé que peu de différence entre la teneur en humidité d'équilibre (TH_e) des différentes espèces examinées (Fig. 1). Ce qui signifierait que, même si le séchoir peut extraire 25 % de l'humidité libre du produit, la quantité retranchée dépend de la teneur initiale en humidité (TH_i).

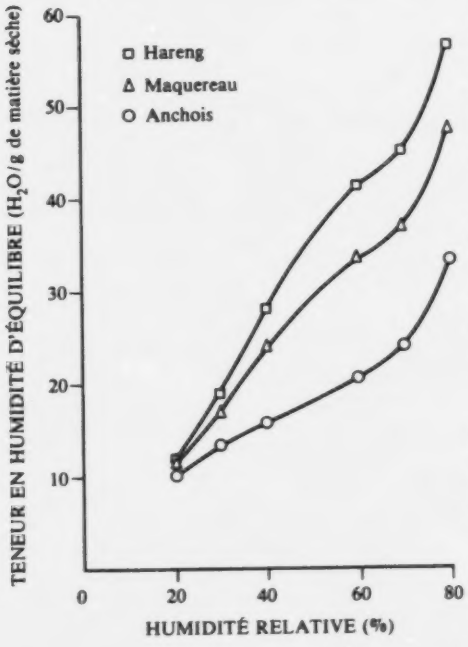

Fig. 1. Isotherme de désorption de l'anchois, du maquereau et du hareng à 43,5 °C et à des humidités relatives variant de 20 à 80 %.

Régimes de séchage

Le taux d'extraction de l'humidité libre du produit ne demeure pas constant. Jason (1962) et Burgess et alii (1967) ont décrit le processus de séchage comme comprenant une phase à régime constant, dans laquelle la déshumidification s'opère à un taux uniforme jusqu'à ce qu'elle atteigne une teneur critique (TH_c), après quoi le taux de déshumidification diminue à mesure que le processus de séchage entre dans la phase à régime décroissant. Dans le cas de la chair de poisson qui, au début, a un contenu humide d'environ 4 g/g de poids sec, l'humidité s'évapore à un régime constant jusqu'à ce qu'elle descende à environ 1 g/g de poids sec (Jason, 1962).

Henderson et Perry (1955) ont formulé dans l'équation suivante l'évaporation de l'humidité libre en surface, durant la phase à régime constant :

$$(1) \qquad (dW/d\theta) = 4{,}39 \times 10^{-5} f_v S(P_v - P_a)$$

$$(2) \qquad = 0{,}4536 K_f S(t_v - t_a)/h_{fg}$$

dans laquelle $(dW/d\theta)$ = le taux de déshydratation en kg d'eau/heure ; f_v = le coefficient de transmission de la vapeur d'eau en kg/m·m²·kg/m²) ; S = surface de la zone humide, en m² ; P_v = pression de la vapeur d'eau à t_v, en atm. ; P_a = pression de la vapeur d'eau dans l'air, en atm. ; K_f = conductance thermique de la pellicule d'air, en kcal/(m·m²· °C) ; t_a = température de l'air en °C ; t_v = température de l'eau, état humide en °C ; et h_{fg} = chaleur latente d'évaporation, en kcal/kg.

L'équation de l'évacuation de l'humidité (équation 1) exprime le taux de déshydratation comme dépendant de la différence de pression de la vapeur entre la surface du produit et la masse d'air, et du coefficient d'évacuation de l'humidité. On peut également évaluer le régime constant de séchage en termes de chaleur transmise au produit pour évaporer l'humidité de la surface (équation 2).

A la fin du régime de séchage constant, le produit hygroscopique a atteint la teneur critique en humidité susceptible d'entretenir une circulation d'eau libre vers la surface à un taux uniforme, lequel est égal au taux maximal d'enlèvement de la vapeur d'eau de la surface.

La diffusion de l'humidité à l'intérieur du poisson diminue en deçà de la quantité nécessaire pour entretenir l'humidité superficielle et le taux de déshydratation du produit baisse. La phase à régime décroissant est régie en grande partie par le déplacement de l'humidité de l'intérieur du produit vers la surface par diffusion liquide et par la suppression de l'humidité de la surface (Hall,

1957). Le régime du séchage, à ce stade, peut être défini par la loi de diffusion de Fick :

$$(3) \qquad (dTH/d\theta) = D_L (\delta^2 TH/\delta X^2)$$

dans laquelle D_L = le coefficient de diffusion en phase liquide applicable au déplacement pendant la phase solide, en m^2/heure ; TH = la teneur en humidité, base sèche ; θ = temps ; et X la distance parcourue par l'humidité, en m.

Une solution de cette équation différentielle (Newman, 1931) postule que nous considérions D comme constant, ce qui n'est pas toujours le cas, et que le séchage s'opère seulement sur une face du produit. L'équation 3 se simplifie comme suit :

$$(4) \quad (TH - TH_e)/(TH_c - TH_e) = 8/\pi^2 \left\{ e^{-D_L \theta \pi^2 / L} + (1/9)e^{-D_L \theta \pi^2 / L} + (1/25)e^{-D_L \theta \pi^2 / L} + \ldots \right\}$$

dans laquelle TH_e = la teneur en humidité d'équilibre, base sèche ; TH_c = la teneur critique en humidité au début du processus de diffusion, base sèche ; et L = la distance de la face au centre d'une dalle séchant sur ses deux faces, ou l'épaisseur d'une dalle séchant sur une seule face, en m.

L'équation 4 peut également être résolue graphiquement à l'aide des cartes Gurney-Lurie, mises au point et utilisées dans les cas de conduction thermique à l'état instable. Henderson et Perry (1955) ont exprimé le taux de déshydratation durant la phase décroissante par l'équation suivante :

$$(5) \qquad (dTH/d\theta) = -t(TH - TH_e)$$

dans laquelle t est une constante de la déshydratation. L'intégration de l'équation 5 donne :

$$(6) \qquad TH - TH_e / TH_i - TH_e = e^{-\theta/t}$$

dans laquelle TH_i = la teneur en humidité initiale, base sèche.

La figure 2 donne les courbes de déshydratation (log. de l'humidité existante VS le temps) dans différentes conditions de séchage. Chaque courbe est étroitement ajustée à l'équation 6 d'Henderson et Perry (1955) et peut servir à déterminer la constante du séchage pour les différentes espèces. On trouvera dans le tableau I les constantes se rapportant à l'anchois, au maquereau et au hareng, pour différentes conditions de séchage. Y est présentée également la durée de séchage (θ) calculée de façon à atteindre une teneur finale en humidité de 20 % (bs). Ce calcul de la durée de séchage (θ) postule un séchage

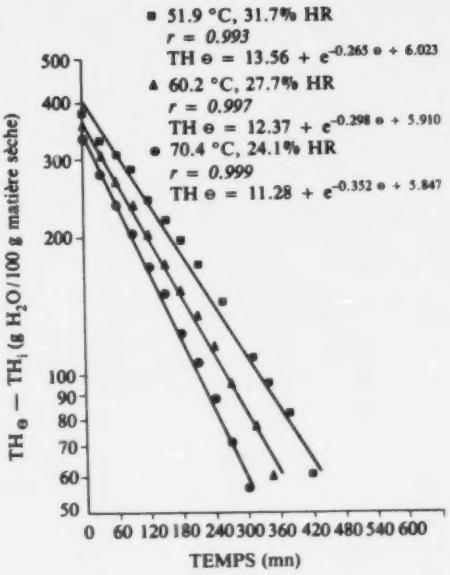

Fig. 2. Rapport entre l'humidité existante (échelle log.) et le temps durant la déshydratation de l'anchois à une vitesse de l'air de 173 m/min à la surface du produit.

continu dans des conditions maintenues constantes.

Psychrométrie

Psychrométrie de l'air du séchoir

La psychrométrie est l'étude du « principe régissant les propriétés et le comportement des gaz dits fixes vis-à-vis de la vapeur condensable » (Brown et alii, 1950). Il est possible d'effectuer un relevé de la température à l'état sec du mélange d'air et d'eau et de la pression de sa vapeur d'eau sous une certaine pression (généralement atmosphérique) pour obtenir ce que l'on appelle une carte psychrométrique (Fig. 3).

Une fois connues les propriétés de l'air, telles que sa température à l'état sec et à l'état humide, il est possible de préciser le point d'état (A, B ou C) de l'air sur la carte psychrométrique. Les points d'état une fois précisés, on peut établir d'autres propriétés physiques comme la densité, la teneur en humidité et l'enthalpie. Par exemple, lorsque l'air au point d'état A se transporte vers un nouveau point B, on dit qu'il a subi un changement d'état. La quantité d'énergie absorbée par l'air pendant son échauffement entre les points A et B

Tableau 1. Constantes de la durée de déshydratation (t) et calcul de cette durée (θ) pour atteindre 20 % de TH, pour l'anchois, le maquereau et le hareng séchés dans diverses conditions.

Vitesse de l'air (m/min)	Température moyenne (°C)	HR moyenne (%)	t (heures)	Durée du séchage θ en heures
Anchois				
173	70,4	24,14	2,84	9,06
	60,2	27,7	3,36	11,25
	51,9	31,7	3,78	13,25
48	69,8	23,97	4,05	13,2
	58,4	27,1	4,8	16,27
	50,02	31,5	5,72	19,72
Maquereau				
173	69,6	23,87	3,69	10,45
	61,9	27,9	3,74	11,70
	49,5	31,6	4,23	14,31
48	69,59	26,9	4,45	13,08
	64,1	23,3	4,68	13,39
	49,83	30,7	6,07	20,11
173 embroché	69,6	23,9	2,67	7,59
Séchage solaire modéré	52,8	38,4	5,0	22,01
Hareng				
173	69,6	28,4	4,15	14,25
	61,47	35,0	7,95	
	52,8	32,2	6,39	24,68
48	70,1	38,6	5,26	24,87
	60,2	27,9	6,93	22,49
	50,27	31,5	8,79	33,20

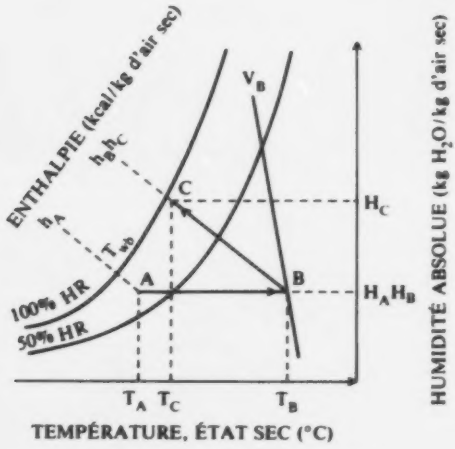

Fig. 3. Carte psychrométrique montrant les points d'état et le mouvement de l'air dans un séchoir.

peut se calculer comme représentant la différence d'enthalpie ($h_B - h_A$) entre les points A et B.

Le séchage à l'air chauffé, en particulier durant la phase à régime constant, constitue un processus constant à l'état sec et peut être exprimé par le tracé de B à C sur la carte psychrométrique. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'humidité du produit provient du passage de l'air, dont la température va en décroissant de T_B à T_C. Parker et alii (1954) ont signalé que durant ce processus de déshydratation la température à l'état humide reste plutôt constante, et normalement, ne varie pas de plus de 1,1 °C.

Le taux de déplacement de l'eau dans le processus à l'état humide a été défini par l'équation d'Henderson et Perry (1955) :

$$W = 89,29V\,(H_t - H_B)\,v$$

dans laquelle W = le taux d'enlèvement de l'eau, en kg heure ; V = le régime de l'air, en m^3 heure·m^2 ; H_t = l'humidité absolue de l'air à l'état C, en kg d'eau kg d'air sec ; H_B = l'humidité absolue de l'air à l'état B, en kg d'eau kg d'air sec ; et v = le volume humide de l'air, en m^3 kg.

L'équation peut également se définir comme exprimant la capacité maximale d'évaporation du séchoir. Dans la pratique, il n'est cependant jamais prudent de s'approcher de trop près du maximum théorique, parce que le séchage devient très lent en approchant des limites de déshydratation et l'extraction de toute l'humidité libre en est prolongée en conséquence. Si l'air est presque saturé, du côté froid, comme l'on peut s'y attendre avec l'équation ci-haut, il se produira

très probablement de la condensation et un écoulement d'eau sur les parois et le toit. Van Arsdel (1942) et Parker et alii (1954) recommandent, dans l'établissement des plans, de maintenir 8,3 °C de dépression, état humide, du côté froid.

L'air ambiant, au point A de la carte psychrométrique (Fig. 3), doit être chauffé afin de conditionner B avant son entrée dans la chambre de séchage. D'après Henderson et Perry (1955) la quantité de cette énergie s'établit comme suit :

$$q = (60V / v)(h_B - h_A)$$

ou

$$q = (0.252V / v)(h_B - h_A)$$

où q = taux d'échauffement, en kcal / heure ; h_A = enthalpie de l'air à l'état A, en kcal / kg ; et h_B = enthalpie de l'air à l'état B, en kcal / kg.

L'efficacité calorifique du système, en pourcentage, est exprimée par Hall (1957), comme suit :

$$\text{Efficacité calorifique} = \frac{\text{(kg d'eau évaporée) (chaleur latente, en kcal / kg)}}{\text{(kg de combustible consommés) (valeur de chauffage du combustible, en kcal / kg)}}$$

où la chaleur latente est considérée comme étant de 555,56 kcal / kg d'eau évaporée.

Conception des séchoirs à air chaud

On définit la déshydratation comme « le séchage, dans des conditions d'humidité et de température surveillées, jusqu'à un certain point définitif, dans un laps de temps donné » (Parker et alii, 1954). Il existe plusieurs procédés de séchage artificiel des denrées mais le plus répandu est le séchage à l'air par convection, parce que les appareils de ce genre sont d'un fonctionnement relativement simple et peu coûteux (Fig. 4 et 5).

Tous les déshydrateurs à air chaud fonctionnent essentiellement d'après le même principe : on fait circuler dans le produit humide un courant d'air chaud qui évapore l'humidité et l'évacue à l'extérieur du séchoir par un orifice de sortie. Ces séchoirs peuvent différer d'après la façon dont l'air est chauffé et mis en circulation.

Beavens (1944) a décrit une armoire-séchoir typique qui comprend : (1) une chambre isolée dotée d'un ensemble de conduits et de chicanes permettant une circulation d'air uniforme dans la masse à déshydrater, (2) un ventilateur de circulation qui souffle dans la masse l'air provenant de la

Fig. 4. Séchoir chauffé avec des balles de riz dans un village de pêche de Mercedes, aux Philippines.

Fig. 5. Mise en place des claies dans un séchoir à poissons à Mercedes, aux Philippines.

source thermique, (3) un dispositif de chauffage à l'intérieur de la chambre, (4) un support pour la masse, également dans la chambre, et (5) un régulateur approprié pouvant modifier les conditions internes du séchoir.

Systèmes de chauffage de l'air de séchage

Hall (1957) a décrit un procédé de chauffage direct de l'air, dans lequel l'air primaire traverse une flamme vive et, du même coup, se mélange au produit de la combustion. De nombreux essais ont eu lieu avec le gaz de pétrole liquéfié (GPL), apprécié comme l'un des combustibles les plus pratiques pour chauffer l'air (UPLB, 1979). Il est idéal pour les dispositifs à chauffage direct, sa combustion s'effectuant sans émanations susceptibles de se communiquer au poisson. Toutefois le prix du GPL est relativement élevé et son approvisionnement est irrégulier comparativement à d'autres sources d'énergie. Il ne convient donc pas pour les installations peu coûteuses de séchage destinées aux petits et moyens transformateurs du poisson. Les systèmes de chauffage à

fils au nickel-chrome à réglage thermostatique se sont avérés fort pratiques en termes de fonctionnement et de réglage de la température. De son côté, le chauffage électrique est généralement moins encombrant que d'autres systèmes et se prête à des applications plus diverses. Tous ces dispositifs ainsi que leur fonctionnement sont, cependant, assez coûteux. De plus, dans la plupart des villages de pêcheurs des Philippines, le transport de l'électricité est aléatoire ou manque totalement.

On a également fait l'essai de brûleurs au pétrole lampant (UPLB, 1979) dans les systèmes à chauffage direct. L'alimentation en combustible s'effectue par tubes reliant un réservoir pressurisé à deux brûleurs également pressurisés. Ces derniers sont protégés par un écran qui empêche le violent courant d'air d'éteindre la flamme. Lorsqu'il fonctionne bien, le brûleur dégage une flamme bleuâtre qui consume presque intégralement le pétrole. On a obtenu avec des systèmes de ce genre une combustibilité dépassant les 84 %.

Les brûleurs aux huiles lourdes ou les fours chauffés au mazout doivent utiliser une surface à échange de chaleur ; ces combustibles, en se consumant, produisent de la suie dont le contact serait préjudiciable au produit (de Padua, 1970). L'échangeur de chaleur, fabriqué normalement de matériaux à conductivité thermique élevée, tels que les métaux, est chauffé par l'huile enflammée et, à son tour, chauffe l'air qui est porté au contact du produit. D'autre part, l'air qui entretient la combustion, ainsi que tous les autres résidus de cette dernière comme la suie et la fumée, sont évacués par une cheminée. Beavens (1944) souligne que ce genre de système n'utilise vraiment que 50 à 75 % de la valeur calorifique du combustible, comparativement aux systèmes de chauffage à flamme directe qui l'utilisent presque totalement. Les fours à échangeur de chaleur peuvent également tirer parti de sources d'énergie peu conventionnelles telles que les résidus de récoltes. C'est ainsi qu'on a fait l'essai d'un séchoir de 1 tonne (Fig. 6) chauffé avec des balles de riz, que l'on a jugé pratique. Les balles sont brûlées dans un four en briques qui chauffe l'air dans un échangeur de chaleur. L'air chaud sert ensuite à sécher le poisson placé dans une chambre de séchage (UPLB, 1979).

Circulation de l'air

Les dispositifs qui font circuler l'air chaud dans la chambre de séchage doivent assurer une répartition uniforme de l'air à l'intérieur, ce qui se réalise normalement par une série de conduits, de chicanes, ou d'aubes directrices.

L'air chaud peut circuler horizontalement au-dessus et en dessous de la masse déshydratée comme dans les déshydrateurs à circulation transversale. Dans les systèmes à circulation directe, cependant, l'air chaud est dirigé à travers la couche de poissons et son support, lequel est le plus souvent un plateau perforé (Beavens, 1944).

Dans la plupart des systèmes circulatoires on prévoit un moyen de recycler l'air chaud après

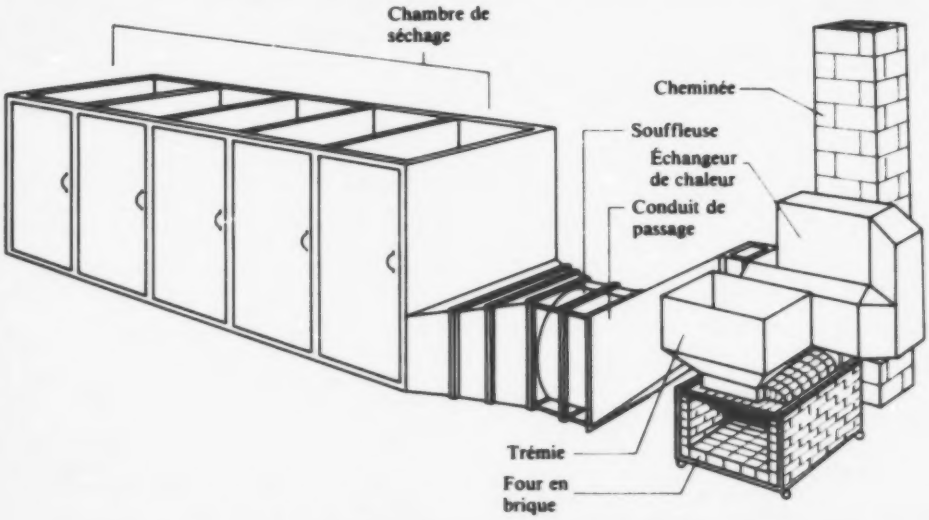

Fig. 6. Vue perspective du séchoir chauffé avec des balles de riz.

qu'il a traversé le produit, et de le remettre ensuite en circulation. Dans les endroits où la température ambiante est sensiblement inférieure à celle du séchoir en marche, on a constaté que la recirculation économise une somme considérable d'énergie et, en conséquence, de combustible (Williams-Gardner, 1971). Le tracé humidité-température sur la carte psychrométrique est reproduit dans la figure 7.

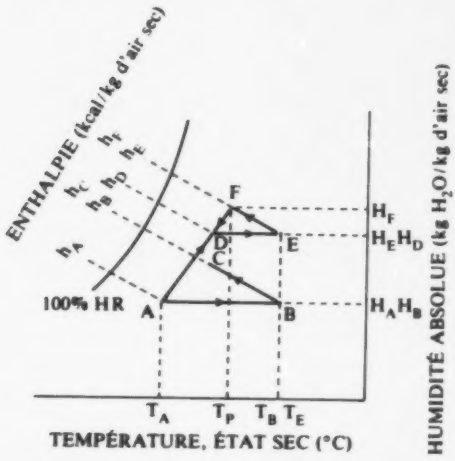

Fig. 7. Carte de l'humidité absolue montrant les points d'état de l'air durant le processus de recirculation. Le mélange d'air frais et recyclé pénètre dans la chambre de séchage au point E et traverse le produit suivant un processus constant à l'état humide. EF, produisant un air chargé d'humidité au point F. Une partie de cet air (F) est évacuée tandis qu'une certaine quantité se mélange avec l'air frais entrant par le point A, produisant un mélange en D. Ce mélange est réchauffé en E et repasse ensuite à travers le produit à sécher.

Dans ce procédé, le séchoir travaille à une humidité plus élevée que dans ceux dépourvus de la recirculation d'air et le séchage exige plus de temps, proportionnel à l'énergie économisée. On peut calculer le pourcentage de l'air remis en circulation par l'équation suivante :

$$\% \text{ de recirculation} = [(H_D - H_A)\ (H_F - H_A)]100$$

où H_A, H_D, H_F = humidités absolues aux points A, D et F, respectivement, dans une carte psychrométrique (Fig. 7), en kg d'eau kg d'air.

Ventilateurs et souffleuses

De Padua (1970) a recommandé des souffleuses centrifuges, surtout dans le cas de grandes installations de séchage où elles peuvent développer des pressions statiques élevées. Cependant, les séchoirs à poissons comme les modèles typiques à claies n'ont pas besoin de développer de telles pressions en raison de la résistance relativement faible du produit au courant d'air. Beavens (1944), quant à lui, estime qu'un fort volume d'air chaud doit pouvoir circuler sur le produit afin d'accroître le taux de déshydratation. A cette fin, on peut recourir à des ventilateurs à flux axial, conçus en vue de déplacer de forts volumes d'air à une pression statique généralement nulle (McCabe et Smith, 1956). Cutting (1942) a suggéré que pour le séchage intensif du poisson, l'on installe des déshydrateurs avec ventilateurs ou souffleuses pouvant débiter 182,9 m min d'air sur le produit. Pour la plupart des denrées alimentaires, Beavens (1944) recommandait des vitesses de l'air atteignant jusqu'à 243,8 304,8 m min.

Support du produit à sécher

Pour les systèmes à flux direct, on préfère des plateaux perforés, qui permettent à l'air chaud de circuler à travers les couches du produit. Amin et Bhatia (1962) ont constaté qu'on peut sensiblement réduire la durée du séchage à l'aide de claies en grillage métallique plutôt qu'avec des plateaux en acier inoxydable ou en aluminium ; toutefois, le treillis métallique a cet inconvénient que le poisson y adhère. On a constaté que de vieux filets de pêche constituaient des claies idéales parce que le poisson n'y colle pas (UPLB, 1979) et peut sécher uniformément dans la chambre sans devoir être retourné.

Amin, H.D. et Bhatia, B.S. 1962. Studies on dehydration of some tropical fruits — Part II: drying rates as affected by various factors. Food Science, 2(3), 69.

Beavens, E.A. 1944. Cabinet dehydrators suited to small-scale operation — Part I. Food Industries, 16(2), 70 72.

Brown, G.G., Katz, D., Foust, A. et Scheidewind, R. 1950. Unit operations. New York, USA, John Wiley and Sons Inc., pp. 559 574.

Burgess, G.H., Cutting, C.L., Lovern, J.A. et Waterman, J.J. 1967. Fish handling and processing. New York, USA, Chemical Publishing Co., Inc., 389 p.

Cutting, C.L. 1942. Engineering problem of the smoke curing of fish. Chemistry and Industry, 61, 365.

de Padua, D. 1970. Grain drying principles, practices and system. Laguna, University of the Philippines at Los Baños, College of Agriculture, UNDP FAO publication.

Hall, C.W. 1957. Drying farm crops. Michigan, USA, Edward Brothers Inc., pp. 245 278.

Henderson, S.M. et Perry, R.L. 1955. Agricultural process engineering. New York, USA, John Wiley and Sons, Inc., 402 p.

Jason, A.C. 1962. Drying and dehydration. In: Borgstrom, G. Fish as food, volume III: Processing — Part I. New York, USA, Academic Press, Inc., pp. 1–50.

McCabe, W. et Smith, J.C. 1956. Unit operation in chemical engineering. New York, USA, McGraw-Hill Book Co., Inc., pp. 162–182.

Newman, A.B. 1931. Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 27, 203.

Parker, M.E., Harvey, E.H. et Stateler, E.S. 1954. Elements of food engineering. New York, USA, Reinhold Publishing Corp.

UPLB (University of the Philippines at Los Baños). 1979. Terminal reports on IDRC-funded improvements of processing and handling of traditional fish products in the Philippines, Phase I and II. Laguna, Philippines, UPLB.

Van Arsdel, W.R. 1942. Tunnel dehydrators and their use in vegetable dehydration. Food Industries, 14(11), 47–50.

Williams-Gardner, A. 1971. Industrial drying. London, U.K., Leonard Hill, 310 p.

Le séchage des raisins dans le nord du Chili

J.M. Olhagaray[1]

Résumé Cet exposé traite des résultats obtenus du séchage des raisins Thompson sans pépins, dans le nord du Chili. Le travail a été effectué durant l'été de 1978 par l'Institut de recherche technologique (INTEC CHILE). Cette variété de raisin est cultivée dans la vallée de la Copiapo et est en majeure partie exportée à l'état de produit frais. Pour des raisons touchant la variété et la qualité, 70 % seulement de la récolte est exportée, laissant environ 800 t de raisin non utilisé.

Malgré des conditions écologiques qui se prêtent parfaitement au séchage solaire des fruits, la région en question souffre de dépression économique et d'un taux de chômage élevé. On a envisagé parmi les moyens d'atténuer ces difficultés, l'adoption de méthodes utilisées en Australie pour le séchage du raisin au soleil. On a fabriqué à cet effet un prototype de séchoir à claie ayant une capacité de 1 t de raisin frais. Une série d'essais de séchage a eu lieu en 1978, dont les résultats ont démontré les possibilités techniques d'application du procédé aux raisins. Une étude économique a suivi concernant la mise en oeuvre d'une installation pouvant sécher 300 t de produits frais. Les résultats laissent entrevoir des déboursés assez modiques, un bon rapport, et l'utilisation d'une main-d'oeuvre abondante.

La vallée de la rivière Copiapo où l'on exploite des vignobles de raisin Thompson sans pépins est une région économiquement faible où le chômage est élevé. La matière première disponible dans le cas qui nous occupe consiste en 800 t, environ de raisin frais (Thompson sans pépins), un excédent des 3 000 tonnes qui sont exportées comme raisin de table. La région se prête parfaitement au séchage solaire mais il reste à mettre au point une méthode qui emploierait beaucoup de main-d'oeuvre, n'occuperait que peu de terrain, dont la construction serait facile et qui n'exigerait pas de combustibles solides ou liquides.

Procédé de séchage des raisins non soufrés

Dans le procédé de séchage du raisin non soufré, on recueille d'abord les grappes et on les lave à l'eau froide pour enlever la poussière et les agents contaminants. Elles subissent ensuite un blanchiment dans une solution bouillante de lessive à 0,3 %. Le trempage, d'une durée de 3 ou 4 secondes, produit dans la peau du raisin des craquelures qui accélèrent sa déshydratation. Les grappes sont ensuite rincées à l'eau fraiche pour interrompre l'action chimique et éviter de cuire le produit. Un autre trempage à l'eau froide supprime les traces de lessive laissées sur la peau des raisins. Ces derniers subissent ensuite un soufrage favorable à leur coloration claire et à leur bonne conservation.

Le raisin est ensuite placé sur des claies (à raison de 15 kg m^2) où on le laisse sécher, en commençant par les étages supérieurs. Le produit doit être protégé contre les insectes et les petits rongeurs. Après séchage, les grappes sont retirées des claies et conservées à l'ombre pendant une vingtaine de jours.

Le dispositif caractéristique comporte un ensemble de claies pouvant contenir 1 t de raisins, une chambre de soufrage construite en briques séchées au soleil, avec revêtement intérieur de bitume, et le matériel connexe comprenant des barils de 200-l, des corbeilles métalliques et un foyer en briques pour le baril de trempage à chaud.

Résultats d'une suite de séchages

D'après les résultats constatés, la durée moyenne du séchage a été de 16 jours et le produit

1. Instituto de Investigaciones Tecnológicas (INTEC CHILE), Casilla 667, Santiago de Chile, Chile.

présentait les caractéristiques suivantes : contenu humide moyen (base humide) de 14,4 %, déviation de 0,6 % et grosseur moyenne de 6,5 mm. Dans l'évaluation de la couleur, 52 % des échantillons présentés étaient d'un jaune pâle uniforme et 36,5 % d'un jaune moins égal, tandis que 11 % étaient de couleur rose tachetée de jaune foncé. Comme défauts majeurs on a relevé 14,5 % de raisins portant des cicatrices, ainsi qu'un résidu de 460 ppm de SO_2. On n'a pas relevé de traces de dommage mécanique, de moisissures, de poussière et d'attaques par les insectes. Le rendement a été d'un kg de raisins secs par 4,4 kg de fruits frais.

Résultats de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité a démontré une capacité de base de 300 t de raisin frais par saison, pour une production de 70 t de raisin sec et une superficie nécessaire de 2,5 ha. L'investissement total s'élevait à 180 000 $US et le fonds de roulement à 20 000 $. Les frais d'exploitation ont été de 41 700 $US par saison et le prix de vente moyen du raisin sec de 1 150 $US tonne (70 % de la production totale est exportée). Le taux de rentabilité a été de 18 %. La main-d'oeuvre nécessaire s'est élevée à 50 personnes.

L'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes en Sierra Leone

Michael W. Bassey[1]

Résumé L'énergie solaire est fréquemment utilisée comme source de chaleur dans les pays en développement. Une des applications les plus courantes, surtout dans les régions rurales, est le séchage des produits agricoles. Cet exposé en étudie divers modes d'utilisation à cette fin.

On évaluera ici l'énergie solaire disponible et son utilisation dans divers types de séchoirs. On y résumera les facteurs affectant la conception de ces installations spécialement destinées aux contrées en développement. D'autres travaux de recherche et de développement s'imposent sur le séchage des récoltes par radiation solaire afin de l'adapter le mieux possible aux besoins de ces pays.

Le séchage des récoltes avec l'aide de l'énergie thermique du soleil se pratique depuis des siècles dans le monde entier ; dans la plupart des pays les procédés n'ont pas changé pour plusieurs raisons reliées en partie au niveau de développement de ces régions. Il est encore de coutume d'étaler les récoltes en plein air au soleil, soit à même le sol, soit sur des plates-formes surélevées. Le procédé est peu coûteux mais n'est pas sans présenter plusieurs inconvénients.

Parmi les désavantages l'on doit mentionner le caractère intermittent de l'ensoleillement, tant pendant la journée qu'aux différentes époques de l'année, les risques de contamination par la poussière et les rongeurs, l'infestation par les insectes, l'exposition des récoltes aux éléments ; autant de causes de pertes et de gaspillage auxquelles s'ajoutent les dégâts causés par les rats, la volaille et les humains.

Les récoltes et les denrées que l'on expose le plus souvent au séchage en plein air incluent les fruits, les légumes, la viande, le poisson, les grains, les épices, le tabac, le café et le cacao. La méthode a également été employée pour l'apprêtage des cuirs et du bois de construction. La qualité des produits obtenue est, le plus souvent, très satisfaisante, bien que susceptible d'améliorations. Ces dernières devraient provenir surtout de diverses modifications aux procédés actuels ou du recours à des systèmes de séchage mieux adaptés à chaque récolte particulière.

Il est possible, fréquemment, de disposer d'installations perfectionnées qui donneront un produit séché de très bonne qualité. Leur prix, cependant, est élevé, la plupart devant utiliser l'énergie électrique pour actionner un ventilateur, et un combustible comme le pétrole ou le gaz pour produire la chaleur nécessaire. Plusieurs pays en développement n'ont pas d'électricité dans les campagnes et les combustibles fossiles doivent être importés. Les progrès de cet ordre paraissent donc peu réalisables à l'heure actuelle. Dans l'Est africain où cette possibilité semble être économiquement réalisable on pourrait combiner l'énergie solaire et celle du vent. Dans l'Ouest africain, par contre, le vent fait défaut en beaucoup d'endroits.

On s'est attaché, au cours des dernières années, à mettre au point des séchoirs solaires destinés aux activités agricoles. Les modèles obtenus jusqu'ici sont surtout de dimensions modestes mais permettent d'abréger la durée du séchage et d'obtenir un produit de meilleure qualité, comparativement aux procédés traditionnels.

Les facteurs financiers impliqués dans ce genre d'amélioration ont fortement influencé l'orientation donnée à l'utilisation de l'énergie solaire comme source de chaleur dans les pays en développement. Beaucoup de modèles affectés à la déshydratation des récoltes sont d'un prix relativement bas par rapport aux installations en usage dans les pays plus avancés.

Cet exposé traitera donc de l'utilisation de l'énergie solaire aux fins et dans les situations mentionnées ci-dessus. On y explique l'interaction de cette énergie et des séchoirs et l'on y

1. Department of Mechanical Engineering, Fourah Bay College, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.

trouvera de brefs commentaires sur l'utilisation pratique de ces derniers en tenant compte des restrictions techniques et financières actuelles. On y présente également quelques exemples de divers types de séchoirs solaires, qui feront mieux comprendre les possibilités de perfectionnement restant à réaliser.

L'énergie solaire utilisable

L'intensité de la radiation solaire, hors de l'atmosphère terrestre, à la distance moyenne entre le soleil et la terre, est de 1,353 kW/m², intensité qui est réduite, à son tour, à un chiffre inférieur à 1 kW/m² à la surface de la terre sous l'effet des nuages, des particules de poussière et des gaz. L'importance de la radiation solaire utilisable varie en fonction de l'endroit, de l'époque de l'année, de l'heure du jour et des conditions atmosphériques générales.

La radiation solaire utilisable à la surface de la terre est constituée surtout de longueurs d'onde variant de 0,3 à 2,4 μm. Dans la plupart des cas pratiques la radiation utilisable est comprise entre 0,38 et 2 μm, couvrant la portée visible (0,38–0,78 μm) et la proche infrarouge (0,78 à 2 μm). La variation d'intensité de la radiation solaire d'après les longueurs d'onde est reproduite dans la figure 1, ainsi que son intensité en dehors de l'atmosphère terrestre et à la surface de la terre. On y voit également l'absorption de la radiation par divers gaz. On notera combien l'atténuation peut être considérable dans tout le spectre.

La radiation totale incidente sur une surface horizontale s'appelle radiation globale ou insolation. Elle comprend la radiation par rayonnement direct, la radiation diffuse et la radiation par réflexion. La radiation directe provient du soleil par un parcours linéaire. La radiation diffuse, cependant, est répartie par toute la voûte céleste où elle est dispersée par les gaz, les particules flottant dans l'air, etc. La composante diffuse de la radiation peut varier de 10 % (par journée très claire), à 100 % (par temps très couvert) de la radiation globale. La radiation par réflexion est produite par des surfaces telles que murailles et constructions, le sol ou d'autres matières.

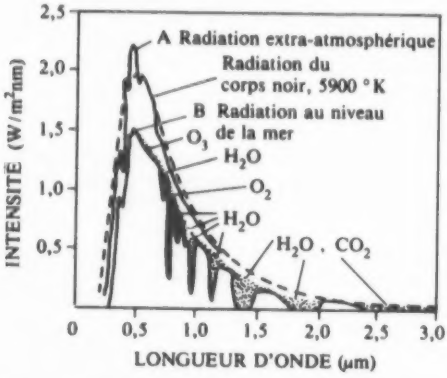

Fig. 1. Variations de l'intensité de la radiation d'après la longueur d'onde.

En pratique, on mesure la quantité de radiation solaire utile à l'aide d'appareils spécialement conçus pour une de ses composantes particulières. Les pyranomètres servent à mesurer la radiation totale, et les pyrehéliomètres la radiation directe. Il en existe divers types (Coulson et Howell, 1980). On mesure la radiation diffuse à l'aide d'un anneau intercepteur qui empêche la composante directe d'atteindre le pyranomètre.

Dans l'utilisation du séchage solaire, il importe de connaître la radiation globale. Bien qu'on puisse la mesurer avec un pyranomètre, le manque d'infrastructure appropriée à l'acquisition des données pertinentes pose des problèmes dans les pays en développement dont plusieurs ne disposent que de chiffres relatifs à quelques années et seulement à un petit nombre d'endroits. Généralement aussi les fonds manquent pour l'achat d'équipements qui permettraient, par exemple, d'observer la radiation solaire en des endroits expérimentaux. Ces restrictions compliquent la mise au point de séchoirs appropriés.

On peut obtenir des estimations de la radiation solaire globale en recourant à des équations empiriques que l'on retrouve dans la documentation existante (Ånström, 1924 ; Reddy, 1971 ; Bassey, 1978 ; Hoyt, 1978 ; Notaridou et Lalas, 1979). Ces données météorologiques servent à cette estimation de la radiation globale.

Une des formules les plus courantes est celle d'Ånström (1924) et elle s'appuie sur des données relatives à la durée d'ensoleillement que l'on peut recueillir à l'aide d'un enregistreur d'insolation. Voici l'équation :

$$Q/Q_o = a + b\, n/N$$

dans laquelle Q représente la radiation globale reçue par une surface horizontale, Q_o est la radiation théorique sur la surface en supposant l'absence d'atmosphère, n est la durée effective de l'insolation et N la durée maximale possible de l'insolation ; a et b sont des constantes, qui dépendent de l'endroit, a étant relativement constant, tandis que b dépend de la latitude.

Hoyt (1978) s'est servi de valeurs climatolo-

giques comme le total de l'eau précipitable, et l'albedo de la surface. Une autre étude (Notaridou et Lalas, 1979) utilise comme paramètres l'élévation, l'humidité absolue et la couverture de nuages pour prévoir la radiation solaire globale. Reddy (1971), dans ses recherches, s'est fondé sur la longueur moyenne des jours, le nombre de jours pluvieux par mois, et l'humidité mensuelle moyenne pour parvenir à la même estimation.

On a remarqué (Bassey, 1978) que les données dont on dispose touchant la radiation utilisable en certains endroits ne sont pas sûres, ce qui fait ressortir la valeur des estimations ci-dessus. On peut généralement se faire une idée de l'exactitude des prédictions, par comparaisons avec des informations fiables recueillies dans d'autres endroits présentant des caractères climatiques semblables, sous les mêmes latitudes. La rareté de données vérifiées sur la radiation solaire dans un endroit quelconque ne devrait donc pas être un empêchement à l'étude pratique du séchage solaire, puisqu'on peut d'ores et déjà recourir à des estimations qui serviront de base à des développements ultérieurs.

Modes d'utilisation de l'énergie solaire pour la déshydratation

L'énergie solaire est, depuis la plus haute antiquité, la méthode la plus employée pour le séchage des récoltes dans les pays en développement où le procédé le plus fréquent est le séchage à l'air libre. Cependant, pour utiliser plus efficacement cette abondante source d'énergie, on a réalisé divers systèmes répondant à des besoins particuliers.

Les séchoirs agricoles peuvent utiliser l'énergie solaire de différentes façons et l'on peut, à ce sujet, les diviser en deux catégories principales : les séchoirs actifs et les séchoirs passifs. Les premiers utilisent un dispositif extérieur comportant, par exemple, un ventilateur pour faire circuler l'air ; les seconds n'en utilisent pas.

Bien que les systèmes passifs semblent se prêter de façon plus réaliste à l'usage des pays en développement en raison des modestes investissements qu'ils nécessitent et de leur économie fonctionnelle, la possibilité demeure de recourir à des systèmes actifs dans le cas d'entreprises relativement considérables. Leur utilisation spécifique dépendra donc de divers facteurs comme l'existence d'une source d'énergie utilisable, l'ampleur de l'installation, la situation géographique, le projet envisagé et la possibilité de se procurer les matériaux nécessaires. Examinons les modalités d'application de l'énergie solaire au séchage des récoltes.

Séchage à l'air libre

Cette méthode fait intervenir l'insolation, les vitesses du vent, les températures de l'air ambiant et son humidité relative pour réduire le contenu humide des produits à sécher. Elle présente de nombreuses variantes mais est largement utilisée en raison de son économie foncière.

On étalera par exemple, la récolte sur une aire préalablement débarrassée des feuilles, des pierres et de la végétation. L'énergie solaire incidente sur la couche mince ainsi exposée fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'humidité. Les mécanismes qui interviennent dans ce processus sont bien connus et ont été décrits dans la documentation pertinente ; citons simplement : la conduction, la convection et la radiation.

La radiation du soleil réchauffe le sol et l'air ambiant. La chaleur se transmet à la récolte par conduction à partir du sol, par conduction et par convection à partir de l'air au voisinage de la récolte, et par radiation provenant du soleil et de l'air ambiant. L'humidité à la surface de la récolte, ou à proximité de celle-ci, est ainsi chauffée et s'évapore, et le flux d'eau des parties profondes se déplace alors vers la surface. La chaleur transmise à la récolte peut aussi pénétrer la masse par conduction, libérant à son tour de la vapeur d'eau. Ainsi donc, le taux de séchage dépend de la radiation utilisable et de la température du sol.

Durant le séchage à l'air libre, l'on devra faire en sorte que le sol ne s'échauffe au point d'endommager la récolte. On étend parfois celle-ci sur une aire en ciment ou en asphalte. Le procédé est plus coûteux en raison des dépenses afférentes à la préparation de la surface, mais il a l'avantage de favoriser le réchauffement de celle-ci, comparativement au sol nu.

En raison de la faible circulation verticale de l'air ou de son absence, à travers la récolte, celle-ci doit être étendue en couche mince pour sécher en plein air, ce qui nécessite des surfaces considérables. Si donc la méthode est relativement économique, elle présente de nombreux inconvénients, ainsi que nous l'avons mentionné plus haut.

Un autre mode de séchage à l'air comporte l'érection de plates-formes à ciel ouvert soutenant des claies sur lesquelles la récolte est étendue, évitant ainsi une partie des inconvénients offerts par le séchage à même le sol. Les rongeurs et les insectes, les fourmis en particulier, peuvent plus difficilement s'y attaquer. Pour mieux utiliser

l'énergie solaire, le fond des claies devrait être en treillis métallique et les claies peintes en noir afin de mieux retenir la chaleur et la transmettre à la récolte. En cas pareil, on peut augmenter l'épaisseur de la couche mise à sécher grâce à la meilleure circulation de l'air rendue possible par le treillis métallique.

Le séchage à l'air sur claies ou plates-formes peut s'appliquer aux fèves, au café, au cacao, etc. Pour d'autres récoltes, comme les raisins, on peut les empiler l'une par-dessus l'autre et les recouvrir d'un toit pour les protéger de la rosée ou des pluies. Ce procédé est en usage en Australie, il est peu coûteux et permet de traiter de grosses quantités de raisins.

Séchage direct

L'exposé concernant le séchage à l'air libre montre que l'air servant à déshumidifier les récoltes agit à la température ambiante et à l'humidité relative (HR). Toutefois, il est bien connu que l'air, à une température et à une humidité relative données, voit diminuer son humidité relative lorsqu'on le chauffe. Ainsi, l'air chauffé extrait plus d'humidité de la récolte que l'air non chauffé. On s'est inspiré de cette constatation dans la construction de divers séchoirs solaires utilisant des procédés directs et indirects de chauffage de l'air ambiant.

Les séchoirs directs comportent une enceinte fermée munie d'une couverture transparente. La récolte y est placée sur des claies et l'énergie solaire est absorbée à la fois par la récolte et par la masse interne du séchoir. La température en s'élevant déshumidifie la masse. L'air chaud humide est évacué par des orifices d'aération ménagés, en général, dans les côtés, l'air frais étant aspiré par d'autres orifices dans la base. Il en résulte donc une circulation constante de l'air ambiant dans le séchoir.

Le Brace Research Institute (BRI, 1979) a fait une revue de ces séchoirs et la figure 2 illustre un modèle typique. La chaleur s'accumule par un effet de serre et l'air humide s'échappe par les orifices prévus. Plusieurs de ces séchoirs directs ont des côtés et un fond isolés. Leur efficacité dépend d'une bonne isolation (étanchéité satisfaisante de la couverture en verre ou en plastique pour empêcher tout mouvement non contrôlé de l'air). Dans ces séchoirs la température peut s'élever à plus de 100 °C d'après le genre et la masse de la récolte à déshydrater. On devra donc veiller à ce que le produit à obtenir ne soit pas surchauffé.

Les séchoirs moins coûteux fonctionnant à l'énergie solaire ne sont pas isolés. Le haut et les

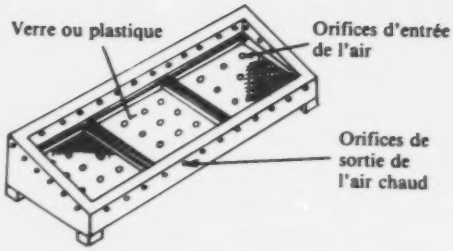

Fig. 2. Schéma d'un séchoir direct typique.

côtés sont garnis d'un revêtement transparent agissant comme collecteur des rayons solaires et protégeant la récolte contre la poussière, les intempéries et les insectes.

La conception des séchoirs directs place la récolte immédiatement sous les couvertures transparentes, inclinées à l'angle voulu pour capter le maximum de radiation. L'amplitude de l'angle peut se calculer d'après les endroits. Toutefois, comme elle change au cours de l'année on recommande comme valeur à adopter : α = latitude + 10°. Bien que cette inclinaison puisse ne pas donner les meilleurs résultats lorsque le séchoir est en service toute l'année, on conviendra que la poursuite du soleil constituerait un exercice onéreux qui rendrait toute l'opération fort peu économique.

La couverture transparente peut être à simple ou double épaisseur avec un intervalle d'environ 1 cm entre les deux. La double couverture a pour effet de réduire les pertes de chaleur par convection dans l'air ambiant et d'augmenter ainsi la température dans la chambre de séchage. Cette élévation de température a l'avantage d'abaisser suffisamment l'humidité relative de l'air pour empêcher la réabsorption de l'eau par la récolte, ce qui prolongerait d'autant le processus du séchage. On devra peut-être adopter la double couverture transparente là où les vitesses du vent restent constamment élevées aux époques du séchage. Le refroidissement de la couverture en verre provoque une déperdition de chaleur accompagnée de condensation sur la surface transparente intérieure de la chambre. En conséquence, le contenu humide des produits augmente et la quantité de radiation traversant la couverture diminue. Ce problème nécessite le recours à un nombre suffisant d'orifices en des endroits stratégiques du séchoir pour assurer l'évacuation de l'humidité.

La régulation de la température dans les séchoirs directs s'effectue en ouvrant ou en fermant les orifices d'évacuation, et elle dépendra de l'expérience de l'usager et du genre de récolte

mise à sécher. On a utilisé avec succès ce genre de séchoirs pour l'okra, les oignons, les abricots, les raisins, l'ail, les prunes, les pêches, les choux-fleurs, etc. (BRI, 1979 ; Bassey, 1980a).

Les points à considérer dans la conception des systèmes à chauffage direct sont, notamment, l'élévation maximale de la température interne, dont dépend l'importance de la charge. Comme on l'a mentionné, l'isolation doit être bonne ; les matériaux disponibles à cette fin peuvent être la sciure ou les copeaux de bois, la fibre de verre, la fibre de noix de coco, la paille, ou d'autres. L'épaisseur de l'isolant variera d'après le matériau utilisé et la différence de température entre l'air ambiant et l'air dans la chambre. On tiendra compte également de la vitesse des vents, facteur qui peut devenir une cause de pertes de chaleur par convection.

Séchage indirect

Dans ce mode de séchage, l'énergie solaire n'entre pas directement en contact avec la récolte. L'air servant à la déshydratation est chauffé dans un collecteur d'air solaire et on le fait ensuite circuler à travers la récolte.

Ce genre de séchoir a été étudié et décrit dans divers ouvrages (Akyurt et Selçuk, 1973 ; Headly et Springer, 1973 ; Satcunanathan, 1973 ; Selçuk et alii, 1974 ; BRI, 1979 ; Bassey, 1980a). L'air peut être mis en circulation par un ventilateur ou par simple convection naturelle. La figure 3 donne une vue schématique d'un séchoir typique de ce genre.

L'énergie solaire est captée dans le réchauffeur d'air par l'effet de serre créé par la couverture transparente et l'absorbeur. En raison de sa légèreté, l'air chaud monte par le collecteur incliné jusque dans la chambre de séchage où est

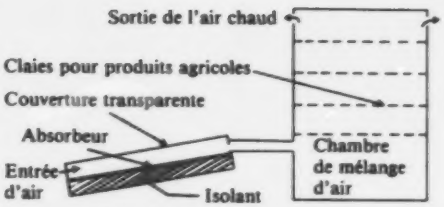

Fig. 3. Schéma des détails principaux d'un séchoir indirect pour récoltes.

placée la récolte. De nombreux agencements sont possibles, selon le mode de circulation d'air adopté.

Dans certains modèles (Akyurt et Selçuk, 1973) on utilisait un collecteur avec couverture en verre et un absorbeur fait de limaille métallique, sur lequel l'air était forcé par un ventilateur et, après échauffement, circulait entre les claies empilées l'une sur l'autre.

Un autre séchoir indirect mentionné par Headly et Springer (1973) est représenté dans la figure 4. L'air ambiant y est chauffé dans le collecteur à double paroi vitrée inclinée, et circule ensuite à travers la récolte par simple convection. Cet air chaud déshumidifie la récolte, se refroidit et descend vers le bas de la chambre de séchage. Parcourant un circuit en boucle fermé, l'air humide est attiré dans le collecteur par un conduit dans lequel l'humidité se condense. Ce système a servi au séchage de l'igname, de la patate douce, de l'oseille et de graminées.

Bassey (1980a) fait état d'un séchoir simple dans lequel l'air circule par convection naturelle, et que présente la figure 5. Il sert au séchage du riz et utilise deux types de collecteurs. Dans le premier, l'air passe entre le couvercle en verre et la plaque absorbante noire, tandis que dans le deu-

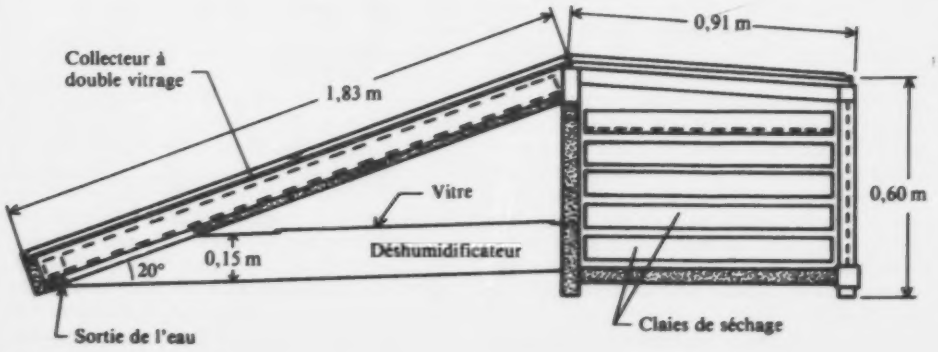

Fig. 4. Schéma d'un séchoir indirect pour récoltes mis au point par Headly et Springer (1973).

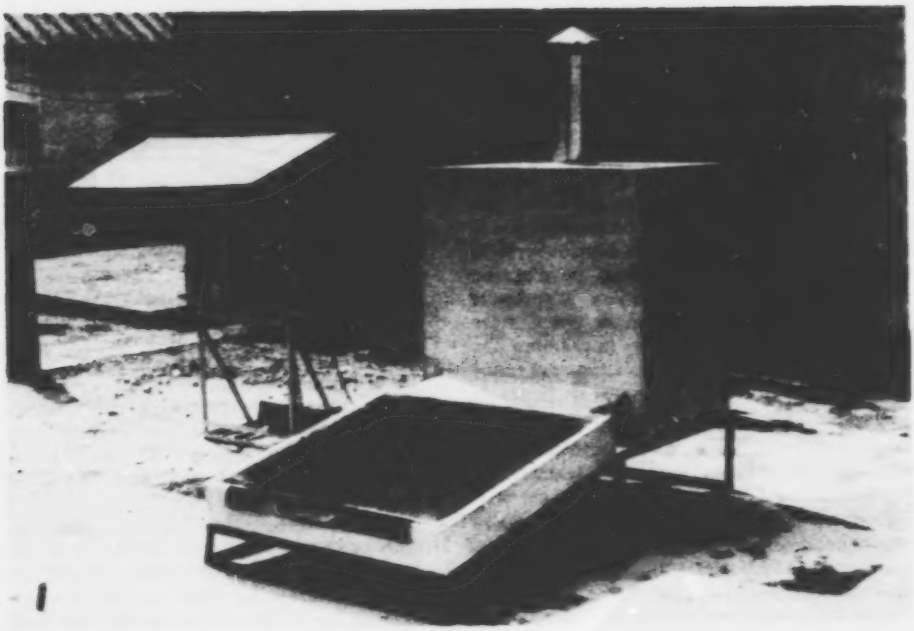

Fig. 5. Séchoir solaire pour produits agricoles, avec cheminée.

xième la circulation a lieu sur les deux faces de la plaque absorbante. Un autre type, utilisant une feuille de plastique comme couverture transparente, utilise des enveloppes de riz brûlées comme absorbant (Exell, 1978). Les parois latérales du séchoir sont en plastique et l'air circule sans l'aide d'un ventilateur.

Les séchoirs indirects doivent porter l'air à des températures permettant de déshydrater les récoltes. La conception des réchauffeurs d'air pour les pays en développement doit viser à minimiser les matériaux nécessaires afin de rendre économiquement attrayante l'acquisition d'un séchoir.

En utilisant un simple vitrage et un collecteur bien isolé, on peut obtenir des températures de 140 °C sur la plaque absorbante. Pour utiliser cette chaleur, on fait circuler l'air sur la plaque. Dans certains modèles, la circulation s'effectue sur une seule face tandis que l'autre face de la plaque est en contact avec un matériau isolant pour empêcher les pertes thermiques par l'arrière du collecteur. Dans un autre modèle, la circulation de l'air se fait sur les deux faces de la plaque (Fig. 6 et 7).

On peut également envisager un collecteur utilisant deux couvercles en verre. Dans ce cas, la circulation d'air peut être dirigée comme dans la

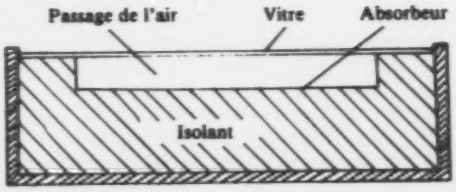

Fig. 6. Schéma d'un réchauffeur d'air dans lequel la chaleur est enlevée sur une des faces de l'absorbeur.

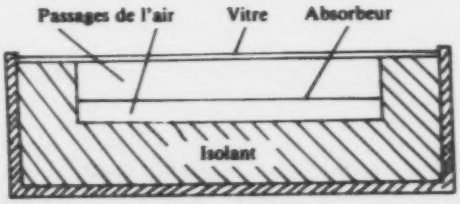

Fig. 7. Schéma d'un réchauffeur d'air dans lequel la chaleur est enlevée sur les deux faces de l'absorbeur.

figure 8. La chaleur s'accumule dans l'espace compris entre le double vitrage et se transmet ensuite au côté inférieur de la plaque absorbante. Ce modèle n'exige pas d'isolant, l'air chaud traversant la récolte immédiatement après avoir

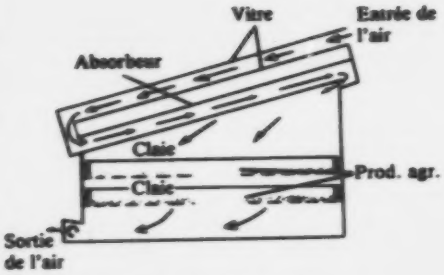

Fig. 8. Collecteur à double vitrage.

quitté la plaque absorbante (Satcunanathan, 1973).

Dans la plupart des modèles existants, le déplacement de l'air provient d'un appareil mécanique, comme un ventilateur. Compte tenu des moyens limités des pays en développement mentionnés plus haut, ces systèmes peuvent fréquemment s'avérer coûteux. On peut tirer parti de l'effet ascendant de l'air chaud en ajoutant une cheminée au dispositif (Fig. 5) ; le tirage produit suffit généralement pour qu'un flux d'air adéquat traverse le collecteur et ensuite les produits. Ce mode de circulation de l'air ne paraît pas susciter grand intérêt dans le cas des séchoirs solaires bien qu'il ait beaucoup d'importance dans certaines parties du monde. Des travaux sont en cours, actuellement, comme nous l'avons rapporté d'après divers chercheurs, en vue de recourir à la convection naturelle.

Une de ces études (Bassey, 1980b) cherche actuellement à améliorer la circulation de l'air en utilisant la radiation solaire pour chauffer directement la cheminée, ce qui aurait pour effet d'élever les températures de l'air et d'accroître son mouvement ascendant. La figure 9 montre une cheminée enduite d'un vernis plastique noir. Des observations préliminaires ont relevé des températures plus élevées à l'intérieur de la cheminée dont la hauteur, par ailleurs, peut être réduite en utilisant ce procédé.

Plusieurs études ont révélé l'utilité des séchoirs indirects dans les pays en développement. Leur conception dépendra cependant des conditions locales et des moyens matériels existants. Le modèle le plus pratique et le plus efficace devra tenir compte de la température et de l'humidité relatives de l'air ambiant, de la température maximale admissible pour le produit à sécher et de son volume. Le modèle de la chambre, par exemple, variera s'il s'agit de fruits ou de grains à sécher. Un autre point à considérer est l'adaptabilité du système prévu : il est en effet souhaitable, mais pas toujours réalisable, de disposer d'un séchoir

Fig. 9. Cheminée enduite d'un simple vernis plastique permettant d'obtenir des températures plus élevées.

solaire pouvant traiter divers types de récoltes, ce qui en augmenterait l'économie.

Séchoirs hybrides et mixtes

L'utilisation de l'énergie solaire dans un séchoir pouvant effectuer aussi bien le chauffage direct que l'indirect permet ce qu'on appelle le séchage mixte. Ce procédé agit d'après un effet de serre à la fois dans la chambre de séchage et dans le collecteur. Bien que cet exposé n'entende pas traiter de l'influence de l'ensoleillement sur la qualité du produit séché, l'on doit mentionner que les séchoirs de type mixte utilisent l'action directe du soleil pour améliorer la qualité de certains produits agricoles. Ces séchoirs ne diffèrent pas sensiblement des autres modèles représentés sauf en ce qu'ils possèdent des parois latérales et supérieures en matériaux transparents comme le verre ou le plastique.

Les séchoirs hybrides sont ceux qui combinent

l'énergie solaire et un chauffage complémentaire. La source de chaleur est alors soit un combustible fossile, l'électricité, ou des déchets agricoles, etc. Il ne sera pas question dans cet exposé de la conception ni du fonctionnement de ces systèmes ; on retiendra simplement que dans certains endroits l'absence d'énergie solaire ne permet pas, pendant au moins quelques mois de l'année, d'effectuer la dessication des produits. On ne peut non plus utiliser les séchoirs solaires la nuit. C'est pourquoi les systèmes comportant un moyen de chauffage complémentaire pourraient s'avérer utiles dans les pays en développement.

Matériaux de fabrication pour séchoirs solaires

La construction de séchoirs solaires destinés aux pays en développement se heurte fréquemment à des difficultés diverses. On doit, par exemple, pouvoir se procurer sur place les matériaux nécessaires dont le coût, par ailleurs, constitue un autre facteur important de l'évaluation que devra faire le propriétaire de l'installation. Enfin, la durée prévisible du séchoir est un autre point à considérer.

Pour les revêtements transparents, les matériaux à retenir sont le verre et le plastique ; le premier ne se détériore pas avec l'âge, tandis que le plastique est affecté par l'exposition aux rayons solaires. Il est souvent prudent de recourir au plastique là où la fragilité du verre peut causer des problèmes. On peut également utiliser le verre et le plastique dans les collecteurs à double vitrage. Leur arrangement devra cependant permettre au plastique de résister à la chaleur et on conseille de l'utiliser comme revêtement supérieur, ce qui du même coup protégera mieux la vitre intérieure.

Le collecteur peut être fabriqué de bois, de tôle galvanisée ou d'aluminium. L'objectif principal doit être d'éviter le mieux possible les fuites d'air et l'humidification de l'isolant ; la fabrication elle-même doit être simple et d'un prix modéré. Le bois et la tôle d'acier galvanisée peuvent servir à fabriquer de bons réchauffeurs d'air. Divers projets utilisent ces matériaux dans la fabrication de collecteurs solaires, grands et petits. Dans le cas du bois, celui-ci devra être traité préalablement contre les insectes et recevoir quelques couches de peinture hydrofuge.

Les méthodes utilisées pour assujettir le vitrage au collecteur dépendent des matériaux. Pour le verre sur du bois, le mastic convient bien, et pour le plastique on se servira de baguettes de bois clouées. Les agents d'étanchéité comme la silicone conviennent pour certaines applications du verre mais ils deviennent onéreux si on doit en employer de grandes quantités.

Les matériaux isolants sont nombreux et nous en avons mentionné plusieurs. On notera que le recours à des matériaux qu'on peut se procurer sur place pour cet usage ne constitue pas nécessairement une économie : ils pourront parfois être remplacés plus avantageusement par d'autres comme la mousse ou la laine de verre qui n'exigent qu'une épaisseur moindre. Si, par exemple, on veut utiliser la paille comme isolant, l'espace à remplir devra avoir 15 cm de profondeur alors que 5 cm suffiront pour la laine de verre, ce qui nécessitera moins de matériaux de construction.

La chambre de séchage peut être construite en tôle ou en contreplaqué. Les séchoirs mixtes utilisent des matériaux transparents comme le verre ou le plastique sur une ou plusieurs parois. Les claies portant les récoltes à sécher sont en simple treillis métallique.

En général, les matériaux entrant dans la construction de séchoirs solaires sont simples et on peut se les procurer sur place dans la plupart des pays en développement. Des droits d'importation applicables à certains de ces matériaux peuvent parfois en augmenter le prix et, donc, le coût de la construction, mais il est souvent possible d'atténuer cet inconvénient en se procurant sur place d'autres matériaux de remplacement.

Conclusion

L'exposé qui précède a tenté d'apprécier l'usage de l'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes. Une documentation existe déjà dont on peut s'inspirer pour fabriquer des séchoirs solaires à diverses fins, d'un fonctionnement satisfaisant. On devra cependant, avant de fixer son choix sur un modèle particulier le soumettre sur place à des tests pratiques. D'autres travaux de recherche et de développement s'imposent dans le sens d'une utilisation plus pratique de l'énergie solaire pour la préservation des récoltes.

Ångström, A.K. 1924. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, p. 121.

Akyurt, M. et Selçuk, M.K. 1973. A solar drier supplemental with auxiliary heating systems for continuous operation. Solar Energy Journal, 14, 313-320.

Bassey, M.W. 1978. A recommended formula for predicting total solar radiation in Sierra Leone. Pre-

sented at the 11th Biennial WASA Conference, 13-18 March 1978, Lomé, Togo.

1980b. Development of solar dryers for agricultural use in Sierra Leone. Interim Report, IDRC Project 3-P-78-0113.

1980a. Solar crop drying in Sierra Leone. Presented at International Symposium on Solar Energy Utilization, 10-20 August 1980, London, Ontario, Canada.

BRI (Brace Research Institute). 1979. A survey of solar agricultural dryers. Technical Report T99, Quebec, Canada, BRI.

Coulson, K.L. et Howell, Y. 1980. Solar radiation instruments. Sunworld, 4(3).

Exell, R.H.B. 1978. A low cost solar rice dryer. Presented at proceedings of the Workshop on Grain Post-Harvest Technology, 10-12 June 1978, Bangkok, Thailand.

Headly, O. St.C. et Springer, B.G.F. 1973. A natural convection crop dryer. Presented at International Congress: The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, Paris, France.

Hoyt, D. 1978. A model for the calculation of solar global radiation. Solar Energy Journal, 21(1).

Notaridou, V.A. et Lalas, D.P. 1979. The distribution of global and net radiation over Greece. Solar Energy Journal, 22(6).

Reddy, S.J. 1971. An empirical method for the determination of total solar radiation. Solar Energy Journal, 13, 289.

Satcunanathan, S. 1973. A crop drier utilizing a two pass solar air heater. Presented at International Congress: the Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, Paris, France.

Selçuk, M.K. et alii. 1974. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf type solar dryers. Solar Energy Journal, 16, 81.

Le séchage solaire et à l'air libre du paddy en Corée

Hak Kyun Koh et Chang Joo Chung[1]

Résumé On a voulu apprécier les avantages respectifs et la faisabilité des procédés de séchage solaire ou de séchage à l'air libre et d'entreposage en silo. On a analysé également les conditions atmosphériques ainsi que divers résultats expérimentaux constatés en Corée entre 1973 et 1980. On a évalué les résultats du séchage solaire à l'air naturel en termes de taux de déshydratation, de variation de l'humidité dans la masse de grain, et de consommation d'énergie par kg d'humidité extrait.

Pour le séchage du paddy on s'est servi de collecteurs solaires avec et sans accumulateur de chaleur. L'exposé examine également la rentabilité du système mis au point.

En Corée, la méthode traditionnelle de séchage du paddy consiste à exposer la récolte au soleil sur le champ avant le battage, et à sécher ensuite le grain battu sur des nattes étendues au soleil. La méthode est laborieuse et soumise aux caprices atmosphériques ; elle entraine presque fatalement des pertes considérables de riz, tant en quantité qu'en qualité. Pour les éviter, on a recommandé d'avancer la moisson et de la faire suivre du battage au champ. Mais surtout, depuis l'introduction en Corée, vers 1969, d'une nouvelle variété à rendement élevé, l'urgence s'est fait sentir d'améliorer les procédés de séchage afin de réduire les pertes dues au clivage des grains. Pour répondre au nouveau mode de récolte avec moissonneuse-batteuse ou lieuse, l'on doit disposer d'un moyen de sécher convenablement une masse considérable de riz à fort contenu humide, moyen auquel ne répond pas le séchage au soleil que les cultivateurs coréens pratiquent traditionnellement.

Le principe du séchage à l'air et de l'application de l'énergie solaire a fait l'objet de beaucoup d'intérêt au cours des dernières années, en raison surtout des conditions atmosphériques favorables, à l'époque de la moisson en Corée. De plus, l'application de l'énergie solaire au séchage du grain semble convenir le mieux à des systèmes à température peu élevée. Et, enfin, le procédé de séchage en silo exposé dans ces pages offrirait l'avantage d'être, en même temps, un mode d'entreposage prolongé et perfectionné du grain.

Notre intention était d'apprécier la faisabilité du séchage solaire et à l'air avec conservation du grain en silo, dans des installations adaptées à l'échelon de la ferme. A cette fin, nous avons dû résumer et analyser les conditions atmosphériques, l'humidité relative et la température moyenne ainsi que divers résultats d'expériences réalisées en Corée, de 1973 à 1980, sur le séchage solaire et à l'air.

Analyse des conditions atmosphériques dans le séchage à l'air

Dans les systèmes de séchage à air, le mode d'aération et la circulation de l'air indispensable dépendent des conditions atmosphériques et de la teneur en humidité (TH) initiale du grain. C'est pourquoi la faisabilité du séchage et de l'entreposage en recourant à l'air doit être abordée en s'inspirant d'une analyse de ces conditions. Si ces dernières, à l'époque habituelle des moissons, sont favorables à un bon séchage, on adoptera de préférence la méthode naturelle, autrement on devra recourir à l'air chaud. On peut évaluer le potentiel de séchage de l'air en mesurant l'humidité relative (RH) et la température à l'aide d'un thermomètre à boule sèche. Pour estimer ce potentiel de façon raisonnable, on doit préalablement analyser les relevés atmosphériques d'une période prolongée.

Les enquêteurs chargés des expériences de séchage à l'air entre 1973 et 1980 ont donc analysé

1. Division of Agricultural Machinery and Process Engineering, Department of Agricultural Engineering, College of Agriculture, Seoul National University, Suweon, Korea 170.

ce genre d'informations couvrant une période de 10 ans, pour obtenir la température et l'humidité relative moyennes dont dépendrait le potentiel de séchage naturel. Leur étude a révélé que la température moyenne en octobre variait de 13 à 16,8 °C, et l'humidité relative de 64 à 76 %. Les moyennes relevées dans 14 endroits, pour le mois d'octobre étaient, respectivement, de 14,9 °C et de 69,4 %.

D'après ces analyses, les chiffres obtenus indiquaient un bon potentiel de séchage, parce que à cette même époque la teneur en humidité d'équilibre (TH_e) des grains était d'environ 15 %. On notera cependant que les températures idéales ne se succédaient pas toujours pendant des jours consécutifs et qu'il fallait parfois interrompre le séchage par suite du temps défavorable.

Dans l'analyse des données atmosphériques, l'humidité relative a été considérée comme le facteur le plus important pour le séchage à l'air. Kim (1974) estimait à 75 % la teneur relative critique (HR_c). A partir de cette hypothèse, il a analysé les relevés atmosphériques et rapporté que la durée quotidienne optimale du séchage dans la région de Suweon était de 9 heures. Pendant ce laps de temps, la température moyenne se maintenait entre 13 et 17,4 °C et l'humidité relative à 66 %. Ces conditions ont été qualifiées de si favorables au séchage que le contenu humide du grain a pu être réduit à 14,2 %, base humide (bh). En admettant que toute journée ayant un taux d'humidité relative de plus de 75 % pendant au moins 3 heures était impropre au séchage, Kim a également rapporté 4 jours de non-séchage en octobre pour la région de Suweon. Dans une autre analyse de Kim et alii (1980), on a aussi relevé 4 jours non utilisables en octobre dans la région de Taegu. Ces observations semblent indiquer que les conditions atmosphériques en Corée, à l'époque de la moisson, offrent d'excellentes possibilités au séchage à l'air.

Analyses d'expériences avec le séchage à l'air

La question de savoir si une installation de séchage et d'entreposage en silo à l'air ambiant est réalisable dans une région agricole particulière, ne peut se résoudre que par des études expérimentales de longue durée. Le succès du séchage à l'air et de l'entreposage en silo dépend en effet des conditions atmosphériques annuelles dans ladite région. L'évaluation technique d'une installation de ce genre doit s'effectuer également d'après les résultats expérimentaux recueillis. Le tableau 1 résume ceux que l'on a obtenus des expériences de séchage à l'air analysées dans cette étude. Comme on le voit dans le tableau, six de ces expériences ont recouru aux mêmes méthodes et ont donné des résultats identiques. Toutes ont eu lieu en octobre, la période de séchage durant environ 10 à 15 jours.

Dans les expériences B, D, E et F, le contenu humide des grains a pu être ramené à 15 %, c'est-à-dire dans les limites jugées satisfaisantes pour un bon entreposage. Par contre, dans les expériences A et C, ce contenu n'a pu descendre à 15 % pendant la période de séchage, le volume d'air mis en circulation étant inférieur à celui des autres expériences dans les deux cas.

Le taux de déshydratation moyen durant la période de séchage a été de 0,03 à 0,11 % par heure de fonctionnement du ventilateur. Ce taux a varié selon que ce fonctionnement était continu ou intermittent. D'autres différences significatives se sont également manifestées entre le stade initial et le stade final du séchage.

Des variations similaires ont été observées dans la teneur moyenne en humidité durant la période de séchage, bien que certaines soient attribuables à la région et au temps. La différence dans la teneur finale en humidité (TH_f) entre les couches supérieure et inférieure du grain est demeurée en deçà de 1 %, et le séchage a progressé uniformément du bas vers le haut. Aucun gradient d'humidité n'a été observé dans le sens radial à l'intérieur du silo à grain. En conséquence, le séchage à l'air avec usage d'un silo pourrait s'avérer un procédé très efficace pour le grain, bien que la période du séchage soit assez longue.

Expérience d'entreposage

Comme il a été mentionné plus haut, le silo à grain joue à la fois le rôle de séchoir et de magasin. Une expérience a eu lieu en trois endroits sur du paddy, comportant dans les trois cas l'analyse des variations de température et du contenu humide du grain, considérées comme facteurs importants pour un entreposage sécuritaire du paddy.

Entre mars et juillet 1979, la température moyenne du paddy entreposé a augmenté de 3 à 30 °C et a généralement dépassé la température ambiante, comme le montre la figure 1. Cette élévation était attribuable à la chaleur de respiration du grain brut et à la transmission par convection de la chaleur provenant de l'extérieur du silo. Durant cette période, la teneur en humidité moyenne est passée graduellement de 13,5 à 15,3 %. En règle générale au cours de l'hiver, on n'a guère constaté de variation de la température

Tableau 1. Résumé des expériences de séchage à l'air.

	No des expériences					
	A	B	C[a]	D	E	F
Surface de la section transv. du silo (m^2)	3,8 (ø2,2 m)	3,14 (ø2,0 m)	2,25 (1,5 × 1,5 m)	2,01 (ø1,6 m)	4,33 (ø2,35 m)	7,1 (ø8,0 m)
Hauteur du silo (m)	1,8	1,8	1,8	1,2	1,2	2,5
Materiaux du silo	acier	acier	contreplaqué	acier	acier	acier
Quantité de paddy (t)	3,6	2,0	1,7	1,0	2,3	4,2
Variétés de riz	Tong-il	Milyang 23	Jinhung	Milyang 23	Suweon 264	Milyang 30
Épaisseur de la couche de paddy	1,6	1,1	1,35	1,1	0,9	0,9
Circulation d'air (cm m^{-1})	2,8	4,0	1,64	3,60	3,60	4,81
Période de séchage	13 10 73 02 11 73	30 09 78 12 10 78	14 10 78 03 11 78	01 10 79 12 10 79	15 10 79 24 10 79	15 10 80 28 10 80
Teneur en humidité initiale (% bh)	22,2	20,0	24,8	19,8	20,0	24,4
Teneur finale en humidité (% bh)	16,7	14,0	15,1	13,7	13,0	15,0
Fonctionnement du ventilateur (heures)	107	210	325	207	66	288
Taux de séchage moyen (% heure)	0,05	0,03	0,03	0,03	0,11	0,03

a) Dans toutes les expériences on s'est servi d'un silo rond en tôle d'acier, à l'exception de C qui utilisait un silo rectangulaire en contreplaqué.

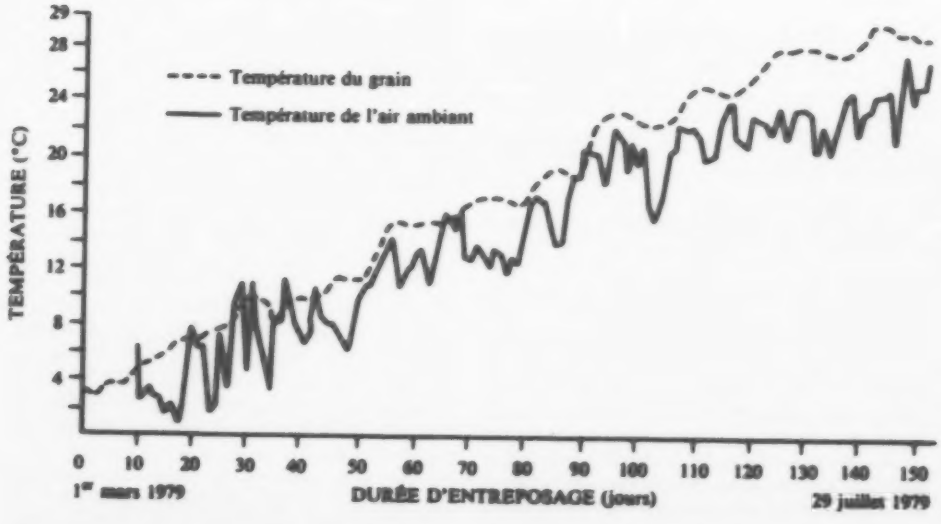

Fig. 1. Variations des températures moyennes de l'air ambiant et du grain pendant l'entreposage (expérience B).

du grain ni de sa teneur en humidité à l'intérieur du silo, mais la différence a été considérable durant l'été. Kim (1974) a signalé le problème soulevé par cette différence. Cependant, Chung et Koh (1980) ont démontré dans leur expérience que l'entreposage estival pouvait se révéler satisfaisant même sans aération.

L'essai de meunerie a été effectué après la fin des expériences d'entreposage. Il a démontré que la récupération de riz brun, de riz de meunerie et de riz de première qualité s'élevait, respectivement à 79,9, 72,8 et 63,63%, indiquant par là que le paddy avait conservé durant son entreposage une qualité conforme au critère de premier degré.

Après la fin de l'expérience B, on a effectué un autre test d'entreposage en utilisant le même silo et le même paddy que dans B. Durant la période de conservation, du milieu d'octobre 1979 au milieu de mai 1980, la teneur moyenne en humidité du paddy s'est maintenue dans les limites de 12,5 à 13,7%, donc très satisfaisante pour assurer une bonne préservation. Le test de meunerie, suivant l'expérience d'entreposage a procuré une récupération de 80% de riz brun, 73% de riz de meunerie et 64% de riz de première qualité. Ces résultats démontrent que la qualité du paddy durant son entreposage s'est maintenue dans les limites du critère de premier degré. On n'a observé aucun dégât imputable aux insectes ou aux moisissures.

Analyse du prix de revient

Comme on le constate d'après les paragraphes précédents, le séchage et l'entreposage en silo du paddy, en Corée s'est avéré vraiment pratique. Encore faut-il, outre les avantages techniques du procédé, en considérer la faisabilité économique. Malheureusement, on ne connaît aucune autre méthode peu coûteuse comparable au procédé expérimenté. Dans la plupart des régions, le séchage traditionnel au soleil reste la règle. Bien que moins coûteux, il expose le grain à des dégâts qualitatifs et quantitatifs, les opérations subissent de fréquentes interruptions dues aux changements de temps inattendus et à des difficultés dans la mécanisation des moissons. Ces difficultés compliquent les possibilités de comparaison entre le séchage à l'air libre et le séchage en silo.

On n'a pas tenu compte dans cette étude des séchoirs circulaires dont il n'existe que peu d'exemplaires en usage. On s'est donc limité aux coûts du séchage en silo. Dans cette expérience le coût total du séchage d'une tonne de paddy, d'une humidité initiale (TH_i) de 20% jusqu'à 14%, s'est élevé à 40000 won (685 KRW = 1,00 $US). Les frais fixes ont été de 32300 KRW (80%) et les dépenses variables de 7700 KRW (20%). Les frais fixes (surtout immobilisations) constituent une proportion très élevée du coût total, que l'on pourrait réduire de plus de moitié en portant la capacité du silo à 2 t et en l'utilisant deux fois par année. Si l'on pouvait abaisser le prix des silos par une production en série, le coût du séchage serait encore plus réduit. A l'heure actuelle, les frais d'exploitation d'un séchoir circulaire en usage dans les régions agricoles s'élèvent à 600 KRW par sac du paddy, soit l'équivalent d'environ 12000 KRW/tonne. Compte tenu de ses autres avantages, comme la qualité de conservation du grain, on peut estimer que le recours au silo s'affirme comme économiquement raisonnable.

Analyse d'expériences de séchage au soleil

Il a été procédé en trois endroits à des expériences de séchage du paddy au soleil. Le même silo à grain utilisé lors de l'expérience de séchage à l'air a servi également aux expériences de séchage à l'air chauffé par le soleil. Le tableau 2 reproduit les résultats de cette série d'expériences.

La figure 2 montre le dispositif de séchage supplémentaire dont on s'est servi dans l'expérience B. Il se compose d'un collecteur de l'énergie solaire à sole plate et d'un accumulateur de chaleur. Dans ce système, une masse de pierres de 7,2 m^3 empilée sur un conduit perforé à l'intérieur du collecteur se réchauffait pendant le jour, et la chaleur ainsi absorbée se transmettait ensuite, durant la nuit, à l'air de séchage. Les collecteurs utilisés dans les expériences C et E comportaient un recouvrement de plastique transparent et un absorbeur en métal noir. Dans l'expérience C, on y trouvait un couvercle ovale et un collecteur absorbeur plat (Fig. 3) tandis que dans l'expérience E le couvercle était plat et l'absorbeur triangulaire. Aucun accumulateur de chaleur n'étant prévu dans ces systèmes, les collecteurs ne servaient à chauffer l'air que durant la journée.

Performance des collecteurs solaires

La performance des collecteurs solaires utilisés dans chacune des expériences a été analysée en fonction de l'élévation de température de l'air de séchage et de l'efficacité du collecteur solaire. De façon générale, les variations de température de l'air durant une journée typique, dans l'ex-

Tableau 2. Résumé des expériences de séchage du paddy à l'air chauffé par le soleil.

	No des expériences		
	B	C	E
Quantités de paddy (t)	2.0	1.7	2.3
Volume d'air en circulation (cm m^{-1})	4.0	1.6	3.6
Période d'expérience	01 10 78 11 10 78	10 10 78 24 10 78	15 10 79 31 10 79
Teneur initiale en humidité (% bh)	19.8	21.9	25.6
Teneur finale moyenne en humidité (% bh)	13.3	13.7	11.2
Durée totale de fonctionnement du ventilateur (heures)	140	130.4	96
Taux de séchage moyen (% heure)	0.05	0.06	0.15
Consommation d'énergie par 1 % de réduction de la TH (kWh)	7.69	6.29	5.33
(séchage à l'air naturel)	(9.70)	(13.64)	(7.54)
Teneur finale en humidité de la couche supérieure (% bh)	13.4	15.1	14.4
Teneur finale en humidité de la couche inférieure (% bh)	12.9	10.2	10.0
Fonctionnement quotidien du ventilateur (heures)	24 heures	8:00 20:30	10:00 17:00

périence B, ont indiqué que l'air chauffé par le tas de pierres atteignait sa température maximale vers 14 heures et son minimum vers 19 heures. Cette tendance s'est retrouvée durant toute la durée de l'expérience. Pour le système donné, la température de l'air traversant le conduit s'est élevée en moyenne d'environ 4 °C durant la nuit par rapport à celle de l'air ambiant, et d'environ 8 °C pendant le jour.

Dans l'expérience C, l'élévation de température de l'air durant l'expérience de séchage solaire a été de l'ordre de 6,5 à 21,8 °C. Le maximum atteint a été de 40 °C et le minimum de 13,2 °C. L'expérience E a révélé les mêmes variations de température. La moyenne pour la période entière du séchage a été de 15,3 °C, ce qui a pu faire baisser l'humidité relative de 63,4 à environ 40 %, en moyenne. L'air chauffé possédant un tel potentiel desséchant, avec sa température élevée et sa faible humidité relative, risque cependant de causer un séchage irrégulier et du surséchage dans le cas de systèmes de séchage à basse température, en silo.

Le rendement du collecteur durant une journée typique de chaque expérience a été calculé en fonction du rapport existant entre l'énergie captée et la radiation utilisable. La quantité d'énergie captée était établie en mesurant le volume et l'élévation de la température de l'air. Les rendements calculés des collecteurs se sont révélés de l'ordre de 35 % dans l'expérience B, de 46,1 % dans l'expérience C, et de 43,1 % dans l'expérience E.

Analyse du séchage solaire

Dans cette section, on comparera les variations d'humidité du grain avec apport d'énergie électrique dans l'équipement de séchage solaire, et celles du séchage à l'air. La figure 4 présente les courbes de séchage du grain situé dans les couches du haut, du milieu et du bas avec l'air de séchage provenant du système à collecteur solaire et accumulateur de chaleur de l'expérience B (Fig. 5 et 6). Durant toute la période du séchage, il a existé quelques gradients d'humidité du grain dans chacune des couches. Toutefois, le gradient allait en diminuant à mesure que le séchage avançait, et la différence du contenu humide entre les couches du haut et du bas a été inférieure à 2 % une fois que la teneur en humidité du grain (TH_r) eût atteint environ 13,3 % de moyenne après 5 jours de séchage.

En comparant les courbes du séchage à l'air moyen avec et sans apport de chaleur supplémentaire, on constate un taux de séchage beaucoup plus élevé avec les séchoirs solaires et moins de temps de séchage nécessaire pour parvenir à la teneur finale en humidité recherchée. Cependant, la comparaison a également fait ressortir un gradient d'humidité légèrement plus élevé entre les couches du haut et du bas durant toute la durée de l'expérience.

Les modifications constatées dans le contenu humide aux divers niveaux de la masse de grain, dans l'expérience B, indiquent que l'appoint de l'énergie solaire durant le jour a pu augmenter d'environ 12 % la différence de la teneur humide

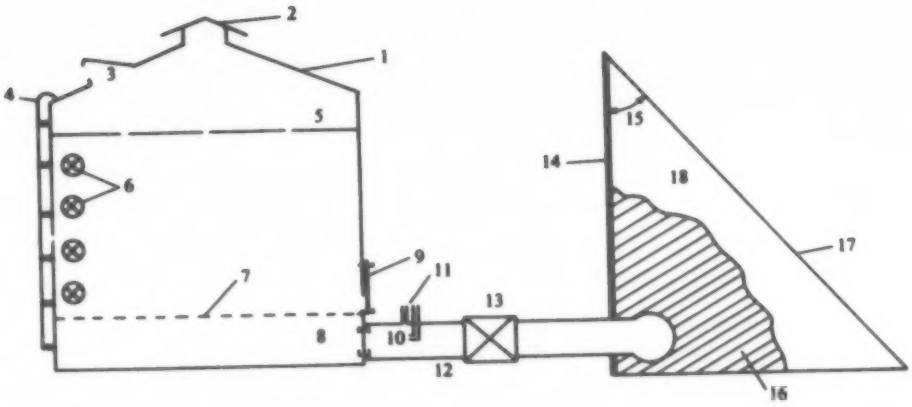

Fig. 2. Schéma du système de collecteur et accumulateur de chaleur solaire relié au silo à grain (expérience B) : (1) silo à grain, (2) ventilateur, (3) ouverture de visite, (4) échelle extérieure, (5) surface du grain, (6) orifices pour prélèvements, (7) plancher perforé, (8) anémomètre, (9) sortie, (10) tube de pression statique, (11) manomètre, (12) conduit d'aération, (13) ventilateur et moteur, (14) paroi isolante, (15) angle à 48°, (16) tas de pierre, (17) plaque avec recouvrement en vinyle, (18) collecteur solaire.

entre le grain à l'entrée et à la sortie de l'air, même si la teneur moyenne s'est élevée à 15 % après 69 heures de séchage. Il a fallu 96 heures pour sécher le grain au degré nécessaire à une bonne conservation, soit 14,4 % d'humidité à la couche supérieure, mais la différence d'humidité a été de 4,4 % à la fin du séchage. Cette différence entre les couches est attribuable à la température élevée de l'air entrant et à son faible taux de circulation. Le fonctionnement continu du ventilateur pendant la nuit, lorsque l'humidité relative de l'air ambiant est élevée, peut contribuer à maintenir un contenu humide uniforme dans toute la masse du grain.

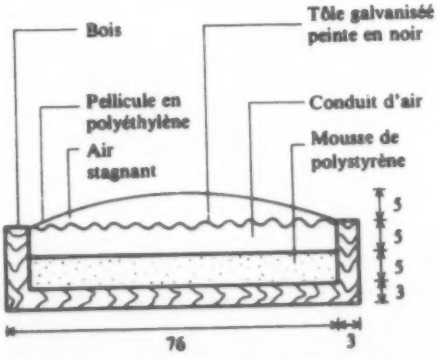

Fig. 3. Coupe d'un collecteur solaire (expérience C) (en centimètres).

Le même régime de séchage s'est manifesté dans l'expérience C, où le ventilateur a été en marche entre 8 heures et 20 h 30, c'est-à-dire plus longtemps que dans l'expérience E. La teneur humide moyenne a été de 13,7 % et la différence entre les couches du haut et du bas a été d'environ 5 % à la fin du séchage. On a également relevé un séchage inégal ainsi qu'un surséchage du grain dans cette expérience.

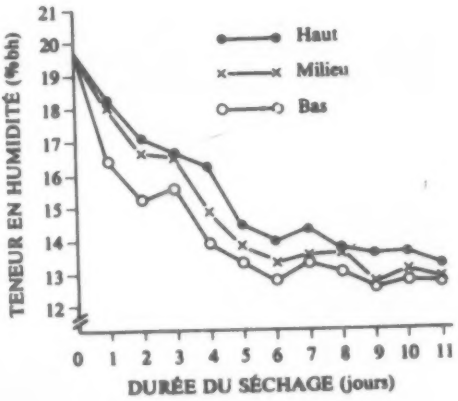

Fig. 4. Changement de la teneur en humidité de chaque couche de paddy séché à l'air chauffé par le soleil.

Tableau 3. Consommation d'énergie par kg d'eau enlevé.

	Expérience B		Expérience C		Expérience E	
	Air libre	Solaire	Air libre	Solaire	Air libre	Solaire
Teneur en humidité (% bh)						
Initiale	20,2	19,8	24,8	21,9	20,0	25,6
Finale (moyenne)	13,6	13,3	15,1	13,7	13,0	11,2
Consommation totale d'énergie (kWh)	64	50	132,3	51,6	52,8	76,8
kWh / kg d'humidité	0,418 (100)	0,333 (79,7)	0,678 (100)	0,320 (47,2)	0,285 (100)	0,206 (72,3)

Fig. 5. Collecteur solaire avec accumulateur thermique pour le séchage solaire (expérience B).

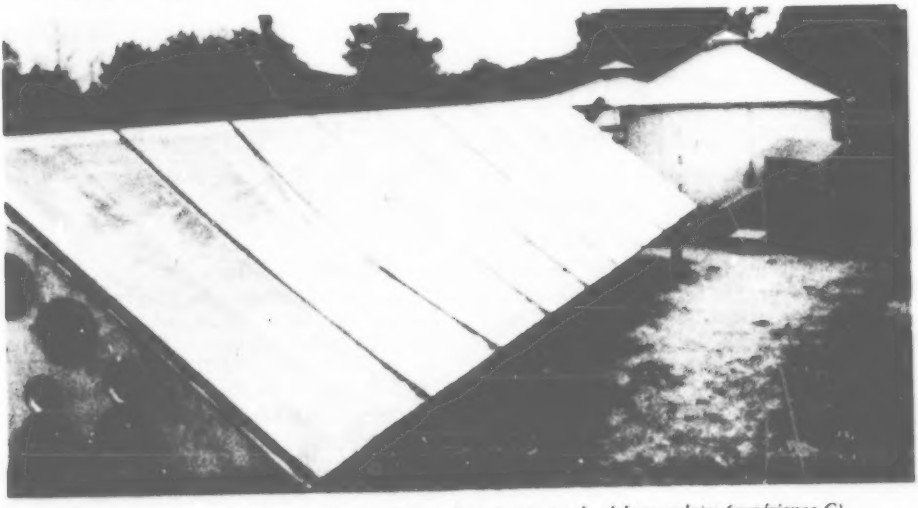

Fig. 6. Collecteur solaire sans accumulateur thermique pour le séchage solaire (expérience C).

L'énergie nécessaire

Le tableau 3 résume les besoins en énergie électrique de chacune des expériences de séchage. En général, la consommation d'énergie par kg d'eau enlevé a été inférieure de 20 à 50 % pour le séchage à l'air chauffé par le soleil comparativement au séchage à l'air libre. L'expérience C a consommé plus d'énergie électrique que les deux autres, en raison du taux inférieur de sa circulation d'air.

D'après les analyses on devra se rappeler que, dans les conditions de fonctionnement et d'air ambiant propres aux expériences B et E, on ne pouvait guère obtenir beaucoup d'économie dans l'apport d'énergie ni beaucoup d'avantage pour le séchage du grain, en ajoutant le dispositif de chauffage solaire. Cependant, on ne saurait sous-estimer la valeur du collecteur solaire lorsque les conditions de séchage sont défavorables. C'est pourquoi d'autres études s'imposent à l'avenir pour mettre au point un dispositif de chauffage d'appoint, adaptable au système de séchage à basse température du grain conservé. On devra s'efforcer également d'abaisser le coût du collecteur solaire et d'en prolonger la durée.

Conclusion

La Corée a grand besoin d'améliorer les techniques en usage pour le séchage et l'entreposage du grain à l'échelle de la ferme. Compte tenu des difficultés d'approvisionnement et du prix élevé des combustibles fossiles ainsi que des restrictions frappant la consommation d'énergie, l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage des grains acquiert de plus en plus d'importance.

L'étude qui précède avait pour but d'apprécier la faisabilité technique du séchage et de l'entreposage combinés, en silo, en recourant à l'air chauffé par le soleil, en profitant d'expériences déjà effectuées. D'après les résultats obtenus de ces dernières, on peut actuellement formuler les conclusions suivantes :

- Les conditions atmosphériques à l'époque du séchage du paddy (octobre) en Corée semblent bien se prêter au séchage à l'air.
- En recourant à l'air pour le séchage en silo, on a pu ramener, en 3 semaines, des quantités de 1 à 4 tonnes de paddy à un degré d'humidité compatible avec un bon entreposage. Cette méthode a également produit un séchage uniforme.
- Dans les deux expériences d'entreposage, la teneur en humidité du paddy s'est maintenue en deçà de 14 % (bh) durant la période de conservation. La qualité du grain ne s'est en aucune façon détériorée.
- Le séchage à l'air chauffé par le soleil a contribué à réduire la teneur humide finale du paddy, à abréger la durée du séchage et à diminuer l'énergie nécessaire pour une quantité donnée d'eau évacuée, comparativement au séchage à l'air libre. Avec les collecteurs solaires, une forte élévation de température de l'air de séchage produit une déshydratation inégale et un surséchage du paddy ; on cherchera donc à obtenir un ensemble économique et durable de collecteur solaire et d'accumulateur de chaleur adaptable au séchage en silo à température peu élevée.
- Le coût d'un système de séchage en silo semble avoir dépassé celui du séchage traditionnel au soleil. Cependant, il paraît avoir des avantages en évitant par exemple le surséchage, en conservant un grain de bonne qualité et en assurant la sécurité de l'entreposage. Si l'on tient compte de ces avantages, et si l'on parvient à réduire les dépenses fixes afférentes au séchage en silo tout en augmentant la capacité de ce dernier et sa fréquence d'utilisation au cours de l'année, le séchage en silo a de bonnes chances de s'avérer économiquement pratique.

Chung, C.J. et Koh, H.K. 1980. Experimental study on the in-bin drying with natural and solar-heated air and storage of rough rice. Journal of Solar Energy Society of Korea, 3(2).

Kim, S.R. 1974. Study on the small grain bin for the improvement of grain drying and storage. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 16(1).

Kim, J.Y., Suh, S.D., Keum, D.H. et Lee, S.K. 1980. Investigation of natural air drying of rough rice based on the weather data in Taegu area. Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery, 5(1).

Un séchoir à grains pour la ferme en Thaïlande

Sriwai Singhagajen[1]

Résumé Cet exposé traite du travail de la Division du génie rural du ministère de l'Agriculture de Thaïlande concernant les techniques post-récolte et, en particulier, l'obtention d'un séchoir à grains qui permettrait aux cultivateurs locaux de traiter une deuxième récolte. Le séchoir contribue à réduire les pertes et la durée du séchage et à améliorer la qualité du produit final. Les travaux concernant ce type de séchoir à riz ont été menés à bonne fin et l'on donne ici les caractéristiques et la performance du modèle réalisé. D'autres recherches se poursuivront pour établir les modifications à apporter au matériel et à son mode d'emploi afin de mieux répondre aux besoins des cultivateurs.

En 1976, la Division du génie rural du ministère de l'Agriculture de la Thaïlande entreprenait une étude des techniques post-récolte, avec le concours du Centre de recherches pour le développement international (CRDI). Un relevé des pratiques en usage à la ferme, effectué cette même année, a conclu que l'introduction de séchoirs à grains à ce niveau s'imposait pour répondre à l'intention des pouvoirs publics d'aider au succès d'une deuxième récolte dans diverses régions du pays. Celle-ci commence en mai et se termine au début d'août, époque de la saison humide. Les cultivateurs font face, alors, à des difficultés dues au manque de jours ensoleillés consécutifs favorables au séchage; des pertes imputables aux moisissures affectent la qualité du paddy, dont la couleur change également, ce qui réduit d'autant son rendement en meunerie. Le séchoir contribue à réduire ces pertes, à abréger le séchage, à stabiliser la qualité du produit et, finalement, à améliorer le revenu du cultivateur.

Le séchage du riz par lots permet d'en ramener la teneur humide (TH) à 14%, ce qui lui assure une meilleure conservation et un rendement supérieur en meunerie comparativement au séchage solaire. La Division du génie agricole a conçu, mis au point et essayé un séchoir dont les mérites principaux devaient être la simplicité de fonctionnement et de construction et utilisant autant que possible la main-d'oeuvre et les matériaux du pays. Les travaux sur ce genre de séchoir à riz sont maintenant terminés et il a été offert aux cultivateurs (Fig. 1) ainsi qu'aux fabricants locaux.

Constitution du séchoir

Le moteur du séchoir doit avoir une force minimale de 6 kW et l'on peut transformer à cette fin le moteur d'un cultivateur mécanique (Fig. 2). Le four, chauffé avec de la balle de riz (dimensions hors-tout : 0,6×0,6×0,6 m) est construit en briques ordinaires, avec armature en cornières d'acier. La balle de riz peut se consumer sans que la cendre n'entre en contact avec le produit. Le four possède un foyer à grille inclinée à 45°, faite de barreaux d'acier de 6 mm de diamètre espacés de 1,5 mm et disposés verticalement. Bien surveillé, ce four maintiendra la température recherchée à ±3°C près. Lorsqu'on ne peut se servir du four à balles de riz, le brûleur au diesel intervient. Le pétrole lampant étant plus coûteux et son approvisionnement incertain, on a modifié le brûleur à creuset vaporisateur de pétrole mis au point par l'Université de Los Baños, aux Philippines (UPLB) en lui ajoutant une autre tôle perforée pour accroître le taux de vaporisation. La consommation de diesel du brûleur est de 1,5 à 2 litres/heure.

Le ventilateur possède un rotor de 0,6 m de diamètre, à huit pales de 0,15×0,30 m inclinées à 70°, dans un carter en tôle métallique de 0,60 m. Son débit peut atteindre 0,5 m^3/sec/m^3 à 1 600 tr/min. La contenance du coffre à grain est de 3,6 m^3. Il est formé de 6 pièces de contreplaqué de 1,22×2,44×0,006 m et de barreaux en bois de

1. Storage and Processing Section, Agricultural Engineering Division, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkhen, Bangkok 9, Thailand.

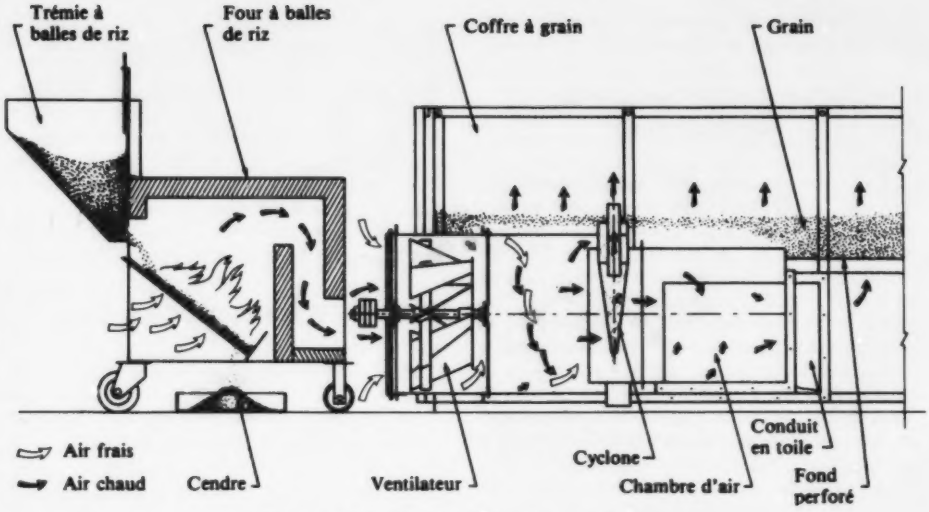

Fig. 1. Schéma du séchoir à grains pour la ferme.

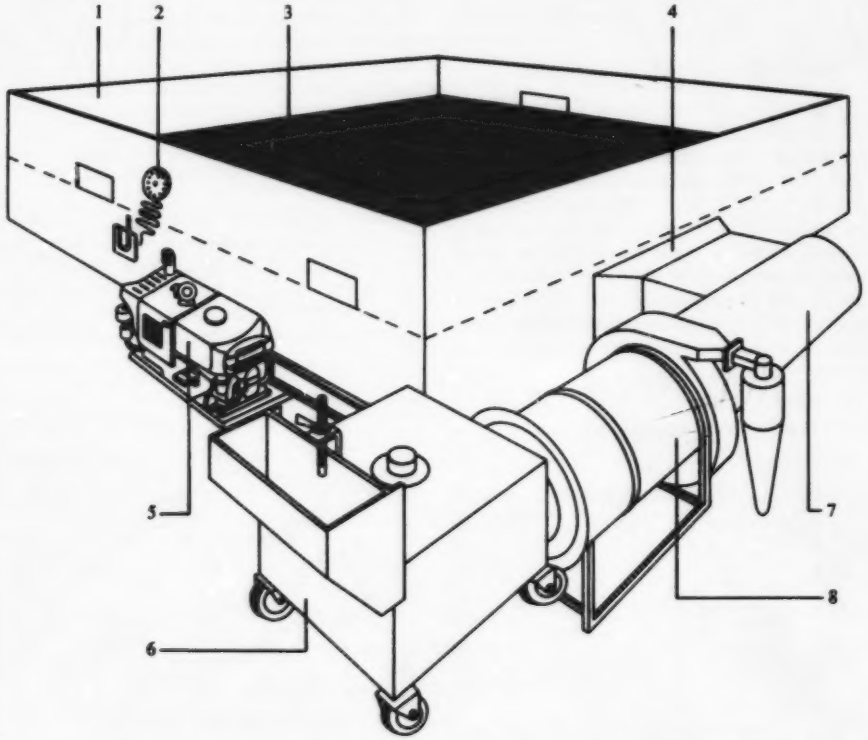

Fig. 2. Éléments du séchoir à riz : (1) coffre à grain (244 × 244 × 122 cm), (2) thermomètre, (3) tamis (n° 8½), (4) manche à air en toile, (5) moteur (6 kW), (6) four à balles de riz, (7) conduit d'air, et (8) ventilateur.

0,038 × 0,076 m et il peut se monter en 40 minutes environ avec quatre personnes.

Coût de fabrication et de fonctionnement

Le moteur diesel de 6 kW, aux cours de 1981, coûtait 700 $US. Les matériaux du four à balles de riz 116 $US, le brûleur au diesel 84 $US, le ventilateur 133 $US et le coffre à grain 202 $US. Les frais de construction se sont élevés à 534 $US et le coût total de l'installation à 1 234 $US.

Les dépenses de fonctionnement dépendent de la durée du séchage, laquelle est fonction de la teneur initiale en humidité (TH_i) et du genre de combustible utilisé, soit : les balles de riz, pour un taux de consommation de 8 à 10 kg/heure pendant 4 à 6 heures de marche (on peut aisément se les procurer gratuitement) ; l'huile diesel, pour un taux de consommation de 1,5 à 2 L/heure, coûte 0,50 à 0,75 $US (utilisée à défaut de balles de riz) ; et l'essence (moteur électrique), pour un taux de consommation de 2 à 2,5 L/heure au coût de 1,15 à 1,40 $US (moteur à essence ou diesel).

Séchage de divers produits agricoles

Paddy

La capacité du séchoir est de 2 t par lot de riz. En général, ce dernier à son arrivée du champ contient de 20 à 26% d'humidité, qui sera ramenée à 14 %, après 3 à 6 heures. Le taux de déshumidification est d'environ 2% par heure. L'écart de température est de 38 à 49°C et la pression statique de 50 mm d'eau. Pour une capacité de 1 tonne, la pression statique devra être de 10 mm d'eau que l'on obtient en ajustant le régulateur de vitesse sur le moteur.

La figure 3 montre les courbes de séchage

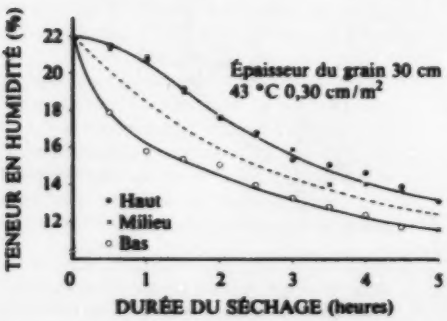

Fig. 3. Courbes de séchage du paddy (source de chaleur : diesel).

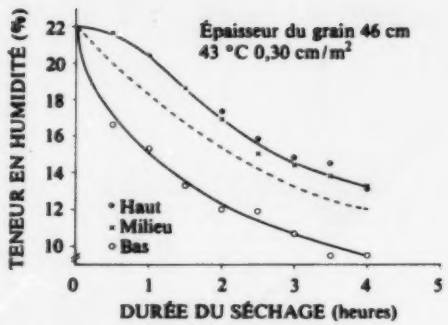

Fig. 4. Courbes de séchage du riz brut (source de chaleur : balles de riz).

caractéristiques du paddy, avec utilisation du brûleur au diesel. L'épaisseur du grain est de 30 cm, TH_i 22%, et teneur finale moyenne en humidité (TH_f) 13,4% après 4 heures de séchage. La figure 4 représente les mêmes courbes avec utilisation du four à balles de riz. L'épaisseur du grain est de 46 cm, TH_i 22% et TH_f 12% pour une durée moyenne de 4 heures de séchage. Ces courbes montrent que le taux de séchage dans le cas du chauffage aux balles de riz est supérieur à celui obtenu avec le chauffage au diesel.

Maïs

La capacité du séchoir est de 1,5 tonne. Les figures 5 à 7 donnent les courbes de séchage caractéristiques obtenues dans trois tests comparatifs de séchage du maïs en épis. Dans le séchage à l'air non chauffé (Fig. 5), l'opération a duré 14 heures, la teneur en humidité initiale moyenne étant de 15,9 % et la teneur finale moyenne de 14,4 %, pour un taux de déshydratation de 0,1 % par heure. Dans le séchage à l'air chauffé aux

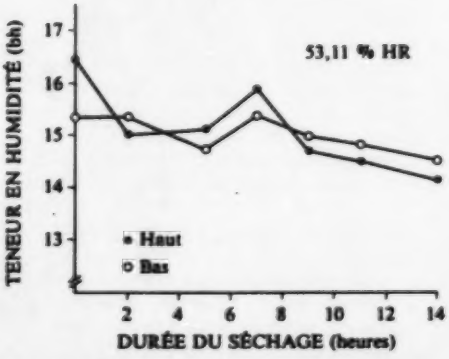

Fig. 5. Courbes de séchage du maïs (air non chauffé).

balles de riz (Fig. 6), l'opération a duré 9 heures, la teneur en humidité initiale moyenne étant de 17,6 % et la teneur finale moyenne de 14,35 % pour un taux de déshydratation de 0,4 % par heure. Le séchage à l'air chauffé au diesel (Fig. 7) a pris 13 heures, la teneur en humidité initiale moyenne étant de 16,4 % et la teneur finale moyenne de 13,5 % pour un taux de déshydratation de 0,2 % par heure. Le séchage à la ferme du maïs en épis comporte généralement les phases suivantes : séchage au soleil de la récolte qui vient d'être cueillie, ayant une TH_i de 40 % (teneur finale de 20 à 22 %), égrenage du maïs et nouveau séchage au soleil jusqu'au point voulu.

Il faut plusieurs jours pour ramener la teneur en humidité de 20–22 % à 8 %. Les procédés permettant d'abréger la durée nécessaire pour franchir les étapes ci-dessus sont le séchage artificiel de lots de maïs en épis suivi de l'égrenage à l'état sec. La durée peut alors être réduite à 1 jour, maximum.

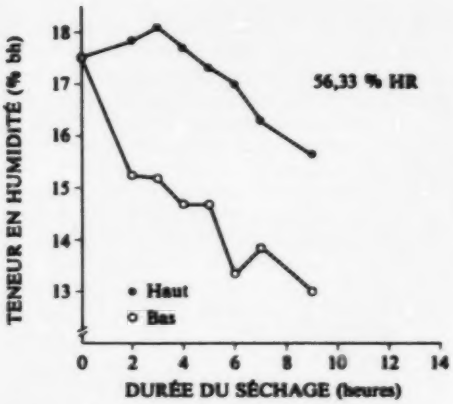

Fig. 6. Courbes de séchage du maïs (source de chaleur : four à balles de riz).

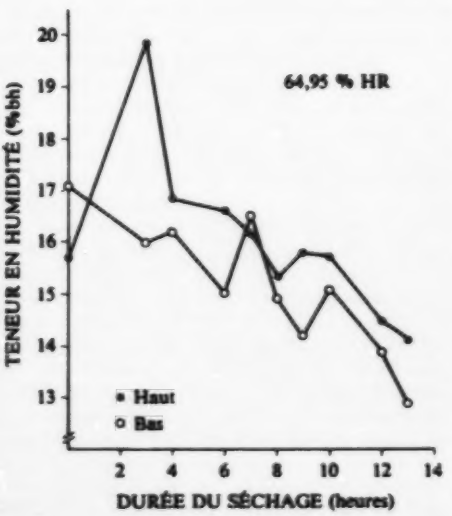

Fig. 7. Courbes de séchage du maïs (source de chaleur : diesel).

Café

La capacité du séchoir est de 140 kg de café en cerises. La pratique courante, actuellement, consiste en un séchage au soleil, d'une durée moyenne de 7 à 10 jours. En cas de pluie, les planteurs sont réduits à entasser leur récolte sous abri et à recommencer l'opération au retour du soleil. Ces manipulations peuvent provoquer des fermentations qui réduiront la qualité et le prix du produit. Les tests de séchage en lots de cerises de café ont été décrits comme suit :

(1) La température maximale convenant au séchage est d'environ 93,3 °C, les cerises tolérant bien les températures élevées.

(2) Plus la température est élevée, plus considérable est le volume d'air chaud obtenu. Ce volume a varié entre 0,028 et 0,047 m^3/sec et sa température a également fluctué entre 65,5 et 93,3 °C. On a cependant constaté qu'un débit de 0,028 m^3/sec n'était pas suffisant pour traverser toute l'épaisseur des cerises.

(3) Le séchage par lots a réduit la durée de l'opération de 7 à 10 jours à seulement 20 heures.

Les figures 8 et 9 donnent les courbes caractéristiques de séchage du café en cerises, d'une teneur en humidité initiale de 64 %. La période de

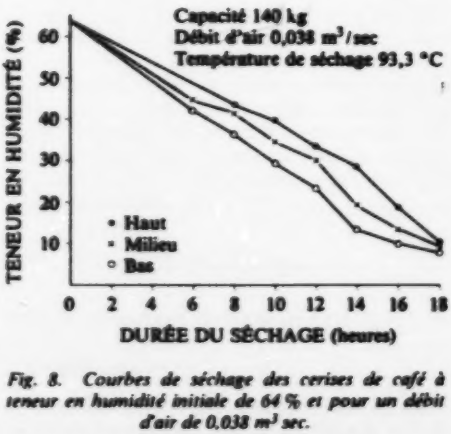

Fig. 8. Courbes de séchage des cerises de café à teneur en humidité initiale de 64 % et pour un débit d'air de 0,038 m^3 sec.

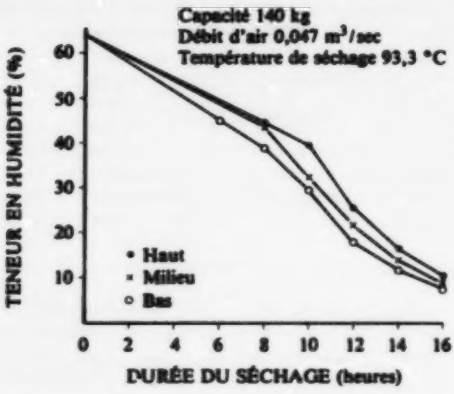

Fig. 9. Courbes de séchage des cerises de café à teneur en humidité initiale de 64 % et pour un débit d'air de 0,047 m³/sec.

séchage a été réduite à 15 heures pour atteindre 8 à 10 % de TH.

Piment

La capacité du séchoir est de 200 à 720 kg. Le séchage du piment au soleil est le procédé le plus courant et sa durée est de 2 à 3 jours. Le piment a tendance à moisir lorsque exposé à la pluie, ce qui nuit à sa qualité et diminue le prix payé au producteur. Le séchoir permet de réduire la durée de l'opération (à 14 % de TH) d'environ un tiers et d'éviter presque totalement les risques d'avarie du produit. Le cultivateur recevra un meilleur prix pour son piment si sa récolte, après séchage, peut atteindre le marché avant les gros arrivages de piment frais qui se vendent alors à un prix inférieur.

Conclusion

Le type de séchoir en lot, pour les grains (paddy), a été conçu, mis à l'essai et présenté avec succès aux cultivateurs pour les aider à s'assurer d'une deuxième récolte. Un certain travail de vulgarisation s'est effectué par l'intermédiaire de la Section du service aux ateliers, le Département de la vulgarisation agricole et l'Office pour l'accélération du développement rural. La source de chaleur utilisable dépendra du combustible disponible dans chaque région, mais on peut se procurer de la balle de riz presque partout. Les cultivateurs ont également mis à l'essai ce type de séchoir pour le traitement d'autres récoltes de rapport telles que le maïs, le café et le piment, ainsi que nous l'avons exposé. D'autres études s'imposent cependant en vue d'apporter les modifications nécessaires aux modèles existants et à leur mode d'emploi pour qu'ils répondent mieux encore aux besoins des cultivateurs.

Appréciation de la valeur économique de diverses sources d'énergie pour le séchage du café

R. García, C. Porres, J.F. Calzada, J.F. Menchú et C. Rolz[1]

Résumé On a effectué l'appréciation économique de cinq sources d'énergie différentes pour la déshydratation du café en parche dans des séchoirs mécaniques statiques à sole plate. Les chiffres donnés ont été relevés dans une installation pouvant traiter jusqu'à 18 160 kg de café par jour, située dans les hautes terres du Guatemala. Les diverses sources d'énergie dont on a fait l'évaluation ont été l'huile diesel, le biogaz produit par digestion anaérobie des résidus du café (pulpe), le bois de chauffage, la pulpe de café partiellement déshydratée, et le soleil (convection forcée). On a également calculé le coût du séchage au soleil sur une aire cimentée (patio). Le coût minimal d'un séchoir mécanique a été obtenu avec la pulpe de café servant de combustible, suivie en ordre croissant par le bois de chauffage, le soleil, l'huile diesel et le biogaz.

Si l'on traçait un graphique de la production du café en regard du temps dans la plupart des plantations (*beneficios*) au Guatemala, le tracé obtenu aurait la forme d'une cloche, représentant la faible production du début et de la fin de la saison de récolte (environ 4 à 6 mois) et un sommet au milieu, d'une durée de 2 à 5 semaines. Le café humide étant très périssable, l'équipement des plantations est le plus souvent conçu pour donner un maximum de rendement à la période critique et doit donc travailler en dessous de sa capacité pendant 40 à 80 % du temps.

Le café en parche lavé est mis à sécher au soleil sur une aire betonnée plate, ou sur des patios, avec chauffage mécanique complémentaire. Au début et à la fin de la saison on recourt seulement au séchage solaire, et on associe les deux systèmes à l'époque de pointe.

Durant les années où les combustibles fossiles n'étaient pas chers, la plupart des séchoirs mécaniques employaient l'huile diesel pour chauffer l'air directement. Le coût actuel de ces combustibles a stimulé la recherche d'autres sources d'énergie possibles. Dans les *beneficios* situées sur les versants des montagnes de l'Amérique centrale, face à l'océan Pacifique, l'élagage annuel des arbres ombrageant les plantations de café fournit en abondance du bois de chauffage utilisable dans les séchoirs lorsque les pluies fréquentes empêchent d'utiliser régulièrement les patios à la saison de récolte. Par contre, dans les *beneficios* situées sur les hauteurs, comme celle de San Lucas Tolimán, Atitlán, au Guatemala, le bois de chauffage est rare et cher, et le séchage solaire sur les patios est restreint par suite du manque de terrain plat.

Les sources d'énergie de rechange retenues pour en faire l'appréciation économique sont donc le bois de chauffage, la pulpe de café déshydratée, le biogaz produit par la digestion anaérobie de la pulpe de café, l'énergie solaire (à convection forcée) et l'huile diesel. On n'a pas retenu d'autres combustibles possibles, comme les enveloppes de café, parce que la plupart des *beneficios* utilisant le traitement humide n'en produisent pas, ni le biogaz provenant de la digestion des boues produites par une usine expérimentale de traitement des eaux dans la plantation de San Lucas Tolimán, qui est encore en cours d'aménagement. La figure 1 donne un tableau des différentes sources d'énergie comprises dans l'appréciation économique.

Méthodologie

Bois de chauffage et pulpe de café

Détails principaux

Le café en parche lavé devait être déshydraté et sa teneur en humidité initiale ramenée de 45 % à

1. Division de la recherche appliquée, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), Avenida La Reforma 4-47 Zone 10, Apartado Postal 1552, Guatemala, C.A.

Fig. 1. Combustibles divers pour le séchage du café.

25 % en 24 heures par lot. L'investissement représenté par un séchoir d'une capacité de 2 043 kg de café en parche séché (10 % TH) par fournée, équipé d'un échangeur de chaleur, comme le prototype fabriqué par l'Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI) à San Lucas Tolimán, s'élève à 7 900 $US (installé). Sa consommation de bois de chauffage ou de pulpe de café desséchée est d'environ 27 kg par heure (d'après les expériences effectuées). Le coût du bois dépend des régions. Dans les hautes terres du Guatemala, on peut se le procurer au coût moyen de 0,25 $US/kg. Le coût de la pulpe a été évalué au prix du séchage naturel sur patios (hors saison : on peut sécher 36 000 kg de pulpe humide (80 % de TH) en couche de 8 cm d'épaisseur sur 1 200 m² de patio, en 6 jours avec une main-d'oeuvre équivalente à 36 jours/homme à raison de 3,50 $US par journée). La pulpe « sèche » est censée avoir une TH de 15 % et son coût, tel que calculé, était de 0,015 $US/kg. Sa valeur calorifique est indiquée dans le tableau 1. Le coût de l'électricité est de 0,12 $US/kWh. Tous les déboursés devaient être couverts par des emprunts à 13 % d'intérêt à échéance de 7 années.

Capacité du séchoir mécanique

La plupart des plantations de café des hautes terres guatémaltèques possédant des patios et des séchoirs mécaniques, on a jugé intéressant d'étudier quelle influence la capacité du séchoir pouvait avoir sur le coût de l'opération, compte tenu des caractéristiques fonctionnelles particulières des *beneficios* dont nous avons parlé plus haut.

Nous avons pris comme sujet pour notre étude économique une *beneficio* d'une capacité journalière de 18 160 kg de cerises de café

Tableau 1. Caractéristiques de la pulpe de café.

Analyse	Résultats
Teneur en humidité, pulpe fraîche	82-71 %
Teneur en humidité, pulpe séchée au soleil	11,16 %
Densité massale, pulpe fraîche	250 kg/m³
Densité massale, pulpe séchée	102 kg/m³
Valeur calorifique, base sèche	$14{,}61 \times 10^6$ J/kg
Cendre (à 575 °C)	8,25 %
Potassium, en KO	3,40 %
Phosphore, en PO	0,30 %
Magnésie en MgO	0,29 %

(4 040 kg/jour de café en parche), comme celle de San Lucas Tolimán. Les coûts du séchage en $US par kg d'eau extraite ont été calculés d'après trois rendements des séchoirs mécaniques, soit 50, 75 et 100 % de la production maximale de la *beneficio*, correspondant respectivement à 2 043, 3 042 et 4 040 kg de café en parche sec par jour. Le format équivalent à 50 % de la production maximale était le plus petit qu'on puisse se procurer dans le commerce.

On a supposé que le séchoir fonctionnait à plein rendement et a été mis en marche lorsque la quantité de café préparée, par jour, à la *beneficio* était suffisante pour remplir la sole du séchoir. Lorsque le séchoir était arrêté, le séchage s'effectuait sur les patios. Dans ces conditions, plus la capacité du séchoir est élevée, plus brève est sa durée d'utilisation et plus coûteuse devient cette dernière. Le tableau 2 résume les conditions répondant à l'hypothèse ci-dessus.

Tableau 2. Conditions régissant l'évaluation économique des diverses sources d'énergie.

Capacité du séchoir		Quantités de café séchées par le séchoir mécanique	
% du maximum	kg/jour	% de la production totale	Durée de fonctionnement (jours)[a]
50	2 043	62	60
75	3 042	56	36
100	4 040	25	12

a) Jours d'opération du séchoir.

Estimation des coûts

Le coût de la main-d'oeuvre par lot mis à sécher a été évalué à 22 heures à 0,55 $US par heure/homme pour le préposé à la chaufferie (constant pour tous les formats de séchoirs) et à 8 heures/homme à 0,44 $US l'heure pour le chargement et le déchargement du séchoir de 2 043 kg/jour. Cet élément du coût a augmenté linéairement en fonction du rendement du séchoir. On a appliqué l'amortissement par annuité constante basé sur une durée de 10 ans pour les moteurs électriques et de 20 ans pour le reste du matériel de séchage, sans valeur récupérable. Le montant investi dans l'équipement a été augmenté selon une échelle mobile appliquant la règle des six-dixièmes, à partir du coût connu du séchoir mécanique de 2 043 kg/jour fabriqué par l'ICAITI.

Les frais d'entretien annuels ont été estimés à 2,5 % du coût d'investissement. Le séchoir de 2 043 kg/jour possède un ventilateur de 2,23 kW et un extracteur de 0,19 kW pour les gaz de la cheminée, soit une consommation totale de 2,42 kW, censée augmenter linéairement en fonction du rendement (en kg/jour) dans le cas des plus gros séchoirs. On a tablé sur la même hypothèse pour augmenter la consommation du bois de chauffage ou de la pulpe sèche servant de combustibles. Le coût total par journée a été divisé par la quantité d'humidité extraite pour cette journée pour obtenir le coût en $US par kg d'eau.

Diesel

Chiffres de base

On peut se procurer dans le commerce un séchoir à chauffage direct à l'huile diesel, d'une capacité de 2 043 kg/jour pour 5 700 $US (installé). Pas d'échangeur de chaleur nécessaire. La consommation de diesel est de 5,03 l/heure coûtant 0,32 $US/litre, et le ventilateur en place est de 3,73 kW. Tous les autres chiffres de base sont les mêmes que pour le séchoir chauffé au bois décrit plus haut. Le rendement du séchoir est également le même.

Coût estimatif

Le coût de la main-d'oeuvre par lot a été évalué à 4 heures/homme à 0,55 $US l'heure pour l'opérateur (constant pour tous les formats de séchoirs) et à 8 heures/homme pour le chargement et le déchargement du séchoir de 2 043 kg/jour, avec augmentation linéaire graduelle en fonction du rendement.

Les coûts d'investissement, d'amortissement, de l'électricité et du combustible ont été calculés sur les mêmes bases que pour les séchoirs chauffés au bois. Les frais annuels d'entretien ont été estimés à 2 % du montant de l'investissement.

Solaire (Convection forcée)

Chiffres de base

On a estimé possible d'utiliser des collecteurs solaires en plastique gonflable, du genre décrit par Baird et alii (1979) pour chauffer l'air destiné à un séchoir à café statique, à sole plate. L'ICAITI a fabriqué un collecteur de ce type pour un projet de recherche sur le séchage du grain, en 1980, au coût de 10,06 $US/m² (installé, ventilateur compris). Un séchoir de 2 043 kg/jour exigera une surface d'environ 150 m² de collecteur et un ventilateur de 1,49 kW. Une fois installé, le coût a été estimé à 2 716 $US.

La radiation solaire a été estimée à 508,8 W/m² (chiffres pour la période de décembre-avril dans la ville de Guatemala, à 1 500 m d'altitude). Tous les autres chiffres de base sont les mêmes que pour le séchoir chauffé au bois, et la capacité du séchoir mécanique est également la même.

Coût estimatif

Le coût de la main-d'oeuvre par lot a été estimé à 16 heures/homme à 0,55 $US l'heure pour l'opérateur (constant pour tous les formats de séchoirs) et à 8 heures/homme à 0,44 $US l'heure pour le chargement et le déchargement du séchoir de 2 043 kg/jour, avec augmentation linéaire en fonction du rendement.

L'amortissement par annuité constante a été adopté en présumant une durée de 10 années pour le ventilateur, de 20 années pour la sole du séchoir, et d'une saison (4 mois) pour le collecteur en plastique, ce qui veut dire que ce dernier doit être changé chaque année, à fonds perdus. Les frais d'entretien (à l'exclusion du collecteur) ont été estimés à 1 % du coût d'investissement. L'augmentation du coût de l'investissement et de la consommation d'électricité a été calculée selon une échelle mobile comme pour le séchoir chauffé au bois.

Biogaz

Chiffres de base

Pour les calculs, on s'est fondé sur un contenu énergétique de 24 MJ/m³ du biogaz (65 % v/v méthane) provenant de la digestion anaérobie de la pulpe de café. On a considéré 1 L d'huile diesel comme équivalent à 1,61 m³ de biogaz. On savait, d'après des résultats expérimentaux, qu'on pouvait obtenir un volume de biogaz par volume du digesteur, par jour, ce qui signifie qu'il faut 0,91 m³ de digesteur pour produire 1 m³ de biogaz par jour. ICAITI a construit plusieurs digesteurs de biogaz pour un autre projet de recherche et recueilli des informations économiques qui lui ont permis d'obtenir un prix estimatif de 23,80 $US par m³ de biogaz par an. La capacité du séchoir mécanique au biogaz est la même que celle du séchoir chauffé au bois.

Coût estimatif

On a remplacé l'huile diesel par le biogaz dans le séchoir à café et l'on a ensuite répété tous les calculs du prix de revient selon le même processus que pour le chauffage au diesel.

Séchage en patios

Chiffres de base

Le séchage au soleil du café lavé, pour le ramener de 45 à 10 % de TH (base humide) prend environ 8 jours sur les patios des *beneficios* dans les hautes terres du Guatemala, où l'on prépare le café durant la saison sèche. Les patios peuvent livrer environ 13,8 kg de café séché (10 % d'humidité) par m² de surface, par 8 jours de séchage.

Capacité de séchage

On a présumé que les patios serviraient de complément au séchoir mécanique ; par exemple, avec un séchoir mécanique d'une capacité équivalente à 75 % de la production maximale, le patio pourrait sécher l'autre 25 %. On a présumé également que les dispositifs mécaniques ne sécheraient le café qu'à 25 % de TH et que ce café, après plusieurs semaines en entrepôt, subirait un deuxième séchage en patio à la fin de la saison lorsque la production est plus faible, et qui abaisserait sa TH à 10 %. Cet échéancier visait à utiliser au maximum les séchoirs mécaniques tout en laissant aux patios la tâche de terminer le séchage (de 25 à 10 % de TH) par le procédé moins efficace.

Coûts estimatifs

Les surfaces unies étant rares dans les hautes terres du Guatemala, on a estimé que les premiers 1 200 m² de patio devaient être aménagés sur un terrain en pente de 10 % et que les autres surfaces nécessaires devraient l'être en terrain incliné à 15 %. Plus la pente était prononcée, plus il fallait enlever de terre, travail qui a coûté 1,25 $US par m³. Le bétonnage subséquent de cette surface a ensuite coûté 4,00 $US par m². Les murets qu'il a fallu construire pour éviter des éboulements ont été évalués à 5,00 $US par m². Comme pour les séchoirs mécaniques, on a présumé que les dépenses d'investissement seraient financées par un emprunt bancaire à 13 % d'intérêt, d'une durée de 7 ans. L'amortissement par annuités constantes a été fixé à 30 ans.

Les frais d'entretien annuels ont été évalués à 1,5 % de l'investissement. La main-d'oeuvre, pour les patios capables de sécher 50 % de la production de pointe a été estimée à 50 heures/homme par lot, à raison de 0,44 $US l'heure, et le coût a varié linéairement en fonction de la capacité de séchage.

Résultats et débats

Les coûts du séchage exprimés en $US par kg d'humidité extraite, pour 3 formats de séchoirs mécaniques et pour le séchage sur patios sont reproduits dans le tableau 3. La figure 2 reproduit également une partie de cette information, dans laquelle on observera que le pourcentage des chiffres relatifs à la production de pointe, pour les patios, sont à l'inverse de ceux se rapportant aux séchoirs mécaniques.

Tableau 3. Coûts de séchage du café en parche lavé ($US/kg d'eau).

Type d'énergie utilisée	Format du séchoir en % de la production de pointe		
	50	75	100
Biogaz	0,130	0,190	0,500
Huile diesel	0,090	0,100	0,140
Soleil (convection forcée)	0,061	0,069	0,071
Bois de chauffage	0,066	0,071	0,129
75 % bois de chauffage 25 % pulpe	0,064	0,069	0,128
50 % bois de chauffage 50 % pulpe	0,062	0,068	0,126
Pulpe de café	0,059	0,064	0,123
Soleil (patios)	0,020	—[a]	0,032

a) Ce coût de production n'a pas été calculé parce que le séchoir mécanique complémentaire aurait été trop petit.

La durée de séchage de 24 heures mentionnée pour réduire la teneur en humidité du café de 45 à 25 % est une valeur moyenne adoptée après consultation avec les opérateurs de séchoirs de plusieurs *beneficios*. Des expériences effectuées par l'ICAITI avec des séchoirs statiques à sole plate à la *beneficio* de San Lucas Tolimán ont révélé qu'il ne fallait que 12 à 17 heures pour ramener la teneur humide du café de 40 à 25 %. On a adopté la durée de 24 heures dans l'évaluation économique parce qu'elle pouvait exprimer des coûts plus modérés. Cependant, en adoptant 12 heures au lieu de 24 heures de séchage, on ne modifierait que le coût total de l'opération mais non la valeur relative des différents systèmes, laquelle est importante aux fins de comparaisons.

Conclusions

- Le séchage au soleil en patios est le procédé le moins coûteux, mais son usage est fortement restreint par la topographie accidentée des hautes terres et par la pluviosité dans la région côtière du Pacifique.
- L'emploi de combustibles solides disponibles sur place pour chauffer l'air à l'aide d'un échangeur de chaleur dans les séchoirs statiques à sole plate s'est avéré le procédé le plus économique pour sécher le café.
- La pulpe de café partiellement déshydratée a été le moins cher des combustibles étudiés ici.
- Le biogaz provenant de la digestion anaérobie de la pulpe de café doit être considéré comme non économique dans les conditions étudiées ici.

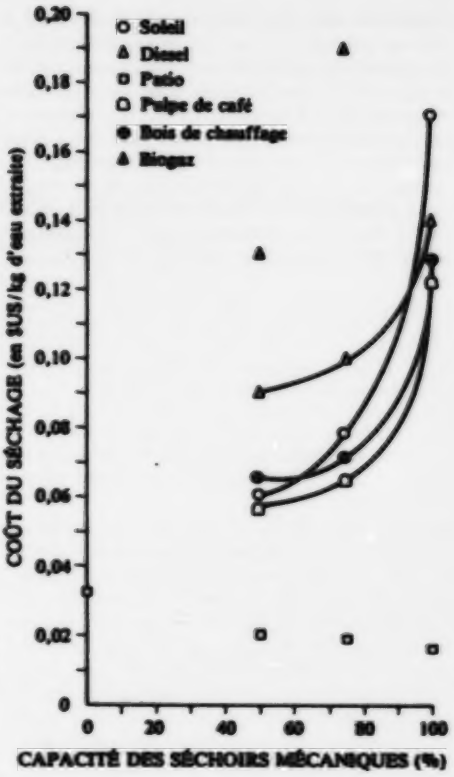

Fig. 2. Coût du séchage et capacité des séchoirs mécaniques.

On avait supposé que l'on pourrait déshydrater la pulpe fraîche sur les patios durant la saison morte, ce qui exigerait un entreposage satisfaisant pendant la période d'activité de la *beneficio* (4 à 6 mois). Bien que ce soit là une pratique courante en Amérique centrale, on y voit une cause principale de la pollution de l'air et des eaux que l'on impute aux *beneficios*. Une option de rechange actuellement à l'étude serait de presser la pulpe avant de l'entreposer. Si cette opération est bien faite, le rendement en jus serait d'environ 60 % du poids initial de la pulpe à l'état

frais, avec extraction d'environ 35 % des solides totaux présents ; ce jus sera probablement biodégradable durant la période d'entreposage de la pulpe fraîche, l'extrait solide ayant une humidité finale de 70 % (Rolz et alii, 1980). Cette réduction de l'humidité et la bonne consistance des solides constitueraient un avantage pour le séchage sur patios. Le jus peut fournir un bien meilleur support pour la production de biogaz que la pulpe naturelle et son rendement dans un digesteur anaérobie pourrait être assez élevé si l'on utilisait de nouveaux types de digesteurs comme, par exemple, les digesteurs de boue à flux ascendant.

Baird, C.D., Chau, K.V. et Bagnall, L.O. 1979. Final report on grain drying with solar energy in the humid south. Florida, USA, Agricultural Engineering Department, University of Florida.

Rolz, C. et alii, 1980. Pressing of coffee pulp. Agricultural Wastes, 2, 207-214.

Séchoirs pour les coopératives de production alimentaire en Indonésie

Sjachputra[1]

Résumé Cet exposé analyse les aspects économiques et techniques de l'utilisation des séchoirs mécaniques par les coopératives indonésiennes. Les modèles examinés sont des séchoirs à sole plate, des séchoirs Lyster, et des séchoirs à caisson modérateur. Leurs caractéristiques et leur fonctionnement sont expliqués, et l'on souligne le rôle important des séchoirs mécaniques pour les coopératives indonésiennes, en vue de constituer des réserves nationales d'aliments et d'améliorer le niveau de vie des membres des coopératives, objectifs qui figurent au programme du Gouvernement.

En Indonésie, on peut pratiquer le séchage au soleil durant l'année entière, et c'est un procédé économique de préservation des aliments. Toutefois la saison des pluies, qui dure de 3 à 4 mois, cause certaines difficultés, particulièrement depuis que l'on a introduit, ces dernières années, des variétés de riz et de maïs à maturité hâtive dont la récolte, en partie du moins, doit s'effectuer dans la saison pluvieuse.

Dans ce pays, les coopératives / KUD-s (coopératives de village groupées) prennent une part active à la campagne nationale de production vivrière, et elles assurent 91 % de l'approvisionnement national. Si considérable que soit cette contribution, la production pourrait être sensiblement accrue en améliorant la qualité du personnel responsable et les moyens matériels disponibles. Une bonne partie du paddy et des récoltes secondaires est séchée au soleil, en plein air. En cas d'averses, ces récoltes risquent d'être complètement perdues. D'autre part, les fluctuations de l'humidité ont des effets défavorables sur la qualité et, en raison des superficies considérables et de la durée qu'exige le séchage au soleil, on ne peut développer rapidement la capacité des installations en cas de grande abondance des récoltes. En outre, les coopératives disposant de moyens de séchage sont encore rares et la majorité restent dépendantes de l'industrie privée.

Depuis le premier plan quinquennal, les pouvoirs publics ont constaté l'inefficacité des aires servant au séchage naturel dans le cadre du programme d'approvisionnement alimentaire. En fait, ils ont déjà implanté certains moyens de séchage mécanique dans les grands moulins à riz appartenant à l'industrie privée ou à des coopératives. Bien que ces tentatives isolées n'aient pas donné de résultats satisfaisants, les pouvoirs publics ne restent pas moins décidés à procurer aux cultivateurs des installations leur permettant de répondre à l'abondance des récoltes même durant la saison pluvieuse.

Aspects techniques de l'usage des séchoirs

Le séchage mécanique du grain présente certains problèmes particuliers. Un séchage trop rapide, par exemple, risque de l'avarier, les températures élevées asséchant la surface du grain plus vite que son intérieur, et celui-ci tend à se cliver. On peut éviter cet inconvénient par l'emploi du caisson modérateur. Un séchage pondéré donne un meilleur produit, mais son inconvénient est de prendre plus de temps. La température idéale pour les séchoirs mécaniques se situe entre 43 et 49 °C. D'après le genre d'alimentation de ces systèmes, on peut les classer en séchoirs à lots (à sole plate) et en séchoirs à mouvement continu.

Dans le séchage par lots, la récolte ne bouge pas, alors que dans ceux à mouvement continu, elle se déplace, en général automatiquement. Les séchoirs de ce type ont une capacité supérieure à

1. Departemen Perdagangan Dan Koperasi (Ministère du commerce et des coopératives), P.O. Box 384, Jakarta, Indonesia.

celle des séchoirs par lots. Les plus utilisés en Indonésie parmi ces derniers sont de deux types : les séchoirs à sole plate fabriqués au pays, et les séchoirs Lyster. Les modèles à mouvement continu sont peu répandus.

Séchoirs à sole plate

Les séchoirs à sole plate sont simples et relativement peu coûteux. Comme source d'énergie, ils utilisent le pétrole. Un ventilateur aspire l'air chaud et le souffle à travers un treillis en acier dans un caisson sécheur. Ces séchoirs comportent généralement un four qui accroît la capacité d'absorption de l'air vis-à-vis de l'humidité de la récolte. La température doit être maintenue à environ 43 °C (réglable d'après la hauteur de la flamme), de façon à détériorer le moins possible la récolte. Les séchoirs à sole plate sont faciles à entretenir, et le four peut être fabriqué sur place (Tableau 1).

Séchoir Lyster

Les coopératives indonésiennes utilisent des séchoirs Lyster depuis 1979 pour le séchage du riz et de récoltes accessoires. Leur capacité est de 15 à 20 t/20 heures. Ces séchoirs ont un four séparé que l'on raccorde lorsqu'on a besoin d'un surcroît de chauffage. Les deux modèles Lyster (ST2 et ST3) d'une capacité de 0,75 à 1 t/h et de 0,5 à 0,6 t/h respectivement, sont identiques dans leurs grandes lignes. Tous deux consomment du diesel pour actionner les ventilateurs assurant la circulation axiale de l'air. Ces ventilateurs sont directement raccordés au moteur. La source de chaleur principale est le diesel. Des rouleaux déplacent la récolte et la déposent dans un caisson qui va en se rétrécissant jusqu'à un couloir triangulaire se déversant dans un sac.

Séchoir à caisson modérateur

Ces séchoirs à mouvement continu sont généralement automatiques ou semi-automatiques et donnent un gros rendement de séchage. Leur avantage est d'effectuer un travail uniforme et ils sont équipés d'un caisson modérateur qui réduit au minimum les proportions de grains craquelés au cours du séchage. Le séchoir Satake MDR-5002 B à caisson modérateur a une capacité de 0,5 à 0,6 t/h, et ses caractéristiques sont reproduites dans le tableau 2.

Plan de production

Dans le développement des coopératives, le Ministère indonésien du commerce et des coopératives a pris une série d'initiatives en vue de collaborer avec l'entreprise privée, des financiers du pays et de l'étranger, à la réalisation d'un plan qui utiliserait les abondantes ressources en richesses naturelles et en main-d'oeuvre du pays. Pour ce qui est notamment des industries post-récolte, le Ministère explore les possibilités d'association avec une entreprise privée étrangère en

Tableau 1. Détails de deux séchoirs à sols plate.

	Ex RPC Tambun	Ex Satake Japon
Caisson de séchage : longueur	360 cm	540 cm
largeur	180 cm	180 cm
hauteur	120 cm	85 cm
Matériau	Contreplaqué et métal	Contreplaqué et métal
Capacité du caisson	1 600–2 000 kg	3 200 kg
Force motrice	Diesel 4 kW	3,7 kW
Four	Séchoir Ex Pelita	Moteur diesel Mitsubishi NM
Rapidité du séchage	0,93–1,3 %/heure	0,88–1 %/heure
Température du séchage	43 °C	40 °C
Consommation de pétrole par le four	2,35 à 3,5 L/heure	1-6 L/heure
Consommation de diesel	0,49–0,59 L/heure	1 à 2 L/heure
Autres accessoires	Ventilateur Manomètre d'eau Thermomètre	Ventilateur Thermomètre Vide de la sole Réservoir d'huile

Tableau 2. Détails d'un séchoir à caisson modérateur.

Description	Caractéristiques
Modèle	MDR-5002 B
Capacité de séchage du caisson	5 tonnes
Taux de séchage	0,7 à 1 %/heure
Température de séchage	50 à 75 °C
Source d'énergie pour le four (brûleur)	Pétrole
Consommation de pétrole	1,5 à 6 L/heure
Ventilateur	Type axial
Force motrice	Moteur diesel 4,1 kW
Réglage de température	Valve thermostatique
Allumage du brûleur	Automatique
Capacité de l'élévateur	6 t/heure
Poids net	1 100 kg

vue d'implanter la construction industrielle de séchoirs mécaniques en collaboration avec des coopératives secondaires.

Un plan de ce genre offrirait les avantages suivants : il stimulerait l'industrialisation et les possibilités d'emplois ; il pourrait utiliser au maximum les matières premières locales, et initier le personnel indonésien à des techniques nouvelles. Les modifications nécessaires aux séchoirs pourraient se conformer aux besoins du pays et l'on éviterait des sorties de devises.

Aspects économiques de l'usage des séchoirs

On a pu souvent affirmer que le coût réel du séchage mécanique du riz était plus élevé que celui du séchage au soleil. La comparaison ne tient cependant pas compte des avantages militant en faveur des procédés mécaniques. Par exemple, les chiffres recueillis par la Direction générale de l'agriculture dans une enquête effectuée dans l'est de Java ont produit les résultats suivants : les dépenses diverses afférentes au séchage du riz avec tous les types de séchoirs mécaniques essayés ont varié entre 0,80 et 1,78 NRPH (630 NRPH = 1 $US) par kilogramme de riz prêt à usiner, soit 1 à 3,7 fois plus que le coût du séchage au soleil. Dans l'ouest de Java, les dépenses variables ont été de 0,69 à 1,69 NRPH/kg, soit 1 à 4 fois plus cher que le séchage au soleil (séchage sur aire).

Les comparaisons négligent les avantages au crédit des séchoirs mécaniques tels que : (1) indépendance vis-à-vis des conditions météorologiques, suppression des risques de détérioration des récoltes par suite d'averses, et possibilités d'utilisation diurne et nocturne ; (2) qualité supérieure du riz obtenu par le séchage mécanique par rapport au riz séché au soleil et prix de vente plus avantageux ; (3) le séchage mécanique n'entraîne pas les pertes, inévitables lors du séchage au soleil, causées par la volaille, les oiseaux et les rongeurs ; (4) le séchage mécanique est plus rapide, permet un roulement plus avantageux du capital et favorise les transactions commerciales. Enfin (5) le séchage mécanique convient à plusieurs récoltes vivrières en plus du riz, ce qui permet à l'usager de réduire ses coûts unitaires.

Le facteur principal dans l'utilisation des séchoirs mécaniques est que ceux-ci favorisent la réalisation du plan de réserves alimentaires pour le pays, notamment pendant les saisons de pluies et en cas de moissons très abondantes.

C'est dans ces conditions défavorables que les prix du riz et de produits agricoles secondaires sont les plus menacés et l'on attend des coopératives équipées de séchoirs mécaniques qu'elles puissent améliorer leurs opérations ainsi que les conditions de vie de leurs membres.

Conclusion

Les séchoirs mécaniques sont indispensables pour permettre aux coopératives de remplir le rôle qui leur est assigné dans la constitution de réserves alimentaires pour le pays, notamment aux époques de récoltes abondantes qui coïncident fréquemment avec la saison pluvieuse. Ces séchoirs contribuent à améliorer la qualité des récoltes, à maintenir la stabilité des prix du riz et d'autres récoltes et à améliorer le revenu et la production des cultivateurs. Actuellement, les types de séchoirs en service sont les séchoirs par lot et ceux à mouvement continu.

Pour un meilleur travail et un rendement supérieur, lorsque la récolte à sécher dépasse 10 t/jour, on préférera les séchoirs Lyster ou les modèles à caisson modérateur. Pour des quantités inférieures à 10 t/jour, les séchoirs à sole plate suffisent.

Malgré le coût relativement plus élevé du séchage mécanique, les avantages qui en découlent justifient son emploi de préférence au séchage solaire.

Commentaires

G. Yaciuk[1]

Le séchage des produits alimentaires agricoles a pour but principal de stabiliser leur qualité pendant une certaine durée et d'en permettre la commercialisation durant toute l'année.

Le séchage au soleil demeure la méthode traditionnelle la plus répandue, le produit étant simplement étendu en couche mince sur le sol et exposé directement aux rayons solaires. La radiation évapore l'humidité de la récolte, qui est absorbée ensuite par l'air ambiant dont l'humidité relative est plus faible, et évacuée par le courant d'air chaud. Malgré son économie, le séchage naturel n'est pas sans inconvénients susceptibles de nuire à la qualité du produit séché : le procédé n'est pas contrôlable et expose constamment la récolte à la contamination par la poussière, les rongeurs, les insectes, les moisissures (si le séchage est trop lent), etc. De plus, exposé à la pluie et au vent, le produit peut être réhumidifié et le séchage est à recommencer.

Il est possible, heureusement, d'améliorer les méthodes traditionnelles. Au lieu du sol naturel, on peut aménager une aire de séchage en béton, mais la surface nécessaire devant être assez vaste, le coût de ces installations risque d'être prohibitif, hormis pour des produits d'un prix élevé. Des nattes ou des claies de séchage surélevées constituent un autre progrès. Ceci permet une bonne circulation de l'air autour du produit et évite plusieurs sources de contamination.

La seule façon de protéger sûrement le produit contre les alternances de beau et de mauvais temps et d'autres risques est de recourir à des séchoirs où la récolte est enfermée dans un type quelconque de chambre. Les séchoirs directs comportent une enceinte recouverte d'une couverture transparente. La récolte y est placée sur des claies et l'énergie solaire est absorbée à la fois par le produit à sécher et par le volume interne du séchoir. L'élévation de la température provoque l'évaporation de l'humidité. L'air chauffé et humidifié s'échappe par les orifices d'aération tandis que l'air frais est aspiré par convection naturelle à travers d'autres orifices ménagés au bas du séchoir.

On devra tenir compte de divers facteurs fonctionnels en utilisant les séchoirs directs :

(1) La température de la chambre de séchage doit être aussi élevée que possible pour parvenir à une faible humidité relative et à une bonne extraction de l'humidité. Simultanément, on devra veiller à ne pas sursécher la récolte. On pourra maintenir une chaleur plus élevée en utilisant une double couverture transparente, un isolant qui réduira les pertes de chaleur à travers les parois de la chambre, et en réglant avec soin l'ouverture des orifices. Le contrôle de la température dans les séchoirs directs est parfois très difficile.

(2) L'efficacité du séchoir a un rapport avec la couleur des produits à déshydrater. Ceux de couleur foncée (agissant comme un corps noir) absorbent plus de radiation, mais sont également plus exposés à changer de couleur (ce que les consommateurs jugent indésirable) par l'altération des pigments végétaux.

Pour remédier aux inconvénients que sont le surséchage et la perte de qualité que l'on reproche aux séchoirs directs, on peut recourir aux séchoirs indirects dans lesquels l'air chauffé dans un collecteur solaire peut ensuite circuler à travers le produit à déshydrater, placé dans une chambre de séchage (il en existe plusieurs modèles). Ce procédé peut utiliser soit la convection forcée (avec ventilateur mécanique) ou la convection naturelle. Le plus souvent, cependant, on ne dispose pas de l'énergie nécessaire pour actionner un ventilateur, ou il s'avère trop coûteux. Les séchoirs mixtes comportent un double système de séchage, à la fois direct et indirect.

1. Coordonnateur technique du colloque, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

Avant d'adopter l'un ou l'autre type de séchoir, l'on s'assurera d'abord de leur simplicité de construction, de fonctionnement et d'entretien. Autant que possible ils seront fabriqués de matériaux locaux, bien acceptés par les utilisateurs, rentables à l'usage et capables (si possible) de traiter divers produits.

Les étapes à suivre dans la mise au point d'une installation de séchage sont les suivantes :

(1) L'ingénieur et ses collègues devront d'abord s'assurer du genre et de la quantité des produits à sécher, ainsi que des besoins particuliers des consommateurs. Une fois connues les teneurs en humidité initiale et finale, la durée maximale du séchage et les quantités à sécher par lot on pourra ensuite calculer les dimensions de la sole ainsi que la quantité d'humidité à extraire, la chaleur requise à cette fin et le volume de l'air à mettre en circulation. Bien que ce ne soit pas indispensable, mais certainement utile, on pourrait incorporer d'abord ces divers facteurs dans un modèle expérimental pour en vérifier le rendement.

(2) On pourra ensuite construire le séchoir et le soumettre à des essais préliminaires. L'économiste ménager peut commencer des tests d'acceptabilité auprès des utilisateurs, et les experts en alimentation évaluer la qualité des produits. A ce point, les tests d'acceptabilité auront à décider si le produit à déshydrater sera présenté comme une nouveauté alimentaire ou une simple amélioration du produit traditionnel séché au soleil, et s'il sera destiné à la consommation familiale du producteur ou au commerce. On trouvera dans la section II divers concepts dans lesquels ces sujets interviennent.

(3) Une appréciation collective et rétrospective des chercheurs intéressés permettra ensuite de modifier le prototype jusqu'à ce que celui-ci soit jugé apte à donner un produit de bonne qualité et bien accueilli des consommateurs.

(4) Enfin, l'on s'assurera par des essais pratiques directs, auxquels participeront des responsables officiels de la planification et de la politique ainsi que des spécialistes de la vulgarisation, que le prototype mis en service fonctionne bien dans diverses conditions d'utilisation.

Recommandations pour les travaux futurs

Les recommandations générales émises après les débats du colloque ont été les suivantes :

- Apporter une coopération pluridisciplinaire à l'étude du séchage.
- Utiliser les prototypes de séchoir déjà éprouvés pour une récolte particulière, dans une région donnée, aux fins suivantes : (1) pour d'autres produits dans cette même région, et (2) pour le même produit dans d'autres régions.
- Préparer un catalogue des prototypes déjà éprouvés et disponibles afin d'établir ceux qui conviennent aux fins recherchées, et quelles sont les récoltes qui se prêtent le mieux à leur utilisation.